ПОСОБИЯ ДЛЯ ТРУДОВОЙ ШКОЛЫ

А. БАЧИНСКИЙ

УЧЕБНИК ФИЗИКИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ОСНОВЕ

ПЕРВАЯ ПОЛОВИНА

МЕХАНИКА ★ ТВЕРДЫЕ ТЕЛА
ЖИДКОСТИ ★ ГАЗЫ ★ ТЕПЛОТА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ШКОЛ I и II СТУПЕНИ

А. БАЧИНСКИЙ

УЧЕБНИК ФИЗИКИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ОСНОВЕ

ПЕРВАЯ ПОЛОВИНА

МЕХАНИКА. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА. ЖИДКОСТИ. ГАЗЫ. ТЕПЛОТА

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ
стереотипное

Научно-Педагогической Секцией Государственного Ученого Совета допущено для школ II ступени

76—90 ТЫСЯЧА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА ★ 1927 ★ ЛЕНИНГРАД

Зак. № 3123.

От автора.

Один из замечательнейших русских педагогов, чьи идеи еще далеко не оценены, покойный В. В. Лермантов различал, по изложению, „физику стерилизованную“ и „физику плодоносящую“. Он говорил: „*Академическая* или *чистая* наука свою линию ведет: ей до обыденной работы человеческой дела нет. Наука собирает знания, записывает их в порядке, чтобы потом удобно было найти, что нужно, старается все объяснить, найти общие причины многих отдельных случаев, чтобы потом можно было вперед предсказать, что выйдет, если сделается то и то вместе. Ну, и выходит что-то вроде огромной кладовой с товаром: все уложено в ящиках, ящики под нумерами, на полках, в шкафах и в комнатах, тоже занумерованных. Когда что нужно, хозяин сейчас справится, где лежит, и найдет, а чужой ничего не найдет, хоть весь день ищи, разве только случайно наткнется. Хозяин, это — ученый, основательно знающий свою специальность; он один может применять эту науку к практике“ [1]). Физика, преподаваемая в школах, есть как бы чрезвычайно сгущенный экстракт такой академической науки. Она представляет собою в маленьком объеме совокупность крупнейших научных обобщений в данной отрасли знания за 2000 слишком лет. А так как этих обобщений очень много в каждом из „отделов физики“, то преподавателю или учебнику, экономящим время и место, приходится говорить обо всем, но в то же время приходится говорить как можно меньше о всяком отдельном предмете, а в особенности о слишком частных случаях, о вопросах практических. Получается знание хотя интересное, развивающее, но *стерилизованное*, в том смысле, что кто обладает только этим знанием, тот не сумеет его применить на практике, а подчас даже не увидит того пути, который ведет от науки к практике. Такое знание недостаточно ценно для большинства людей, которые хотят не только *знать*, но и *уметь*.

В. В. Лермантов был горячим пропагандистом „физики плодоносящей“, т.-е. непосредственно применимой к решению технических вопросов. Опыты подобного изложения он дал в своих книжках: „О том, как машины работают“ и „Материя и энергия“.

---

[1]) *Лермантов*, О том, как машины работают, гл. I. См. также его „Методику физики“.

Настоящий учебник *написан в духе его идей:* с постоянным обращением к технике, — так, чтобы читающие и изучающие, с одной стороны, почерпнули отсюда не только знание, но и умения, а с другой стороны — чтобы им сделалось ясно, что целесообразное решение чисто-практических вопросов может получиться *только на основании науки* [1]). Поэтому я позволяю себе посвятить эту книжку памяти Владимира Владимировича Лермантова [2]).

А. Бачинский.

Москва, 7 июля 1924 год

---

[1]) Выдвинуть практические применения физики на должное место при весьма скромном объеме книжки можно было, конечно, только ценою известных жертв. Опытный читатель сам увидит, какие главы, обычно составляющие непременную часть курса физики, здесь сокращены или вовсе отсутствуют (и какие обычно отсутствующие, наоборот, введены сюда).

[2]) Кроме названных выше трудов В. В. Лермантова, мне при составлении данной книжки сильно помогло выпущенное в 1923 г. берлинским издательством „Восток“ в очень хорошем русском переводе сочинение *Ганфштенгеля*: „Техническое мышление и творчество“. Отсюда мною заимствовано между прочим немалое число рисунков. Я пользуюсь случаем, чтобы самым горячим образом рекомендовать книгу Ганфштенгеля всякому преподавателю физики, желающему оживить свое преподавание.

Вступление.

Физические тела.

Человек наблюдает вокруг себя огромное множество **физических тел**, т.-е. предметов, ограниченных некоторым объемом и доступных наблюдению или непосредственно — при помощи свойственных человеку чувств, или с помощью приборов [1]).

Каждый камень, каждое растение, тело человека или животного, земной шар, каждый предмет, изготовленный человеком (напр., машина), все это — физические тела. Иные физические тела бывают невидимы: таков, напр., воздух в обычных условиях; зато его можно осязать, напр., во время ветра или во время быстрого бега. Облако или туман есть физическое тело, видимое нами; оно состоит из мелких водяных капелек; эти капельки могут испариться, т.-е. обратиться в пар; пар невидим для нас: таким образом, *облако* исчезает, но *физическое тело* не исчезает, а переходит в другую форму: где были водяные капельки, носившиеся в воздухе, там теперь — прозрачная смесь воздуха с водяным паром. В том, что водяной пар имеется в воздухе, можно бывает убедиться при помощи особого прибора (гигроскопа).

Всякое физическое тело может более или менее легко разделяться на части. Каждая часть или кусок, отделенный от физического тела, есть тоже физическое тело; напр., крыло птицы, шестерня машины, осколок артилерийского снаряда.

„Кирпичи мироздания“.

Подвергаясь крайней степени раздробления, физическое тело может распасться, наконец, на мельчайшие частицы или зернышки, которые уже не подлежат дальнейшему дроблению. Эти зернышки существуют от века; они не создаются, не уничтожаются. Они представляют собой, так сказать, „кирпичи мироздания“: из них построен мир, как здание из кирпичей. Разобрав здание, можно из тех же кирпичей построить другое; так и мир постоянно перестраивается по-новому, представляя собой все новые и новые группировки несчетного множества одних и тех же основных частичек. Эту мысль поэтически выразил знаменитый английский драматург Шекспир в следующих стихах:

Кто поселял в народах страх,
Пред кем дышать едва лишь смели,
Великий Цезарь — ныне прах,
И им — замазывают щели! [2]).

---

[1]) В физике, для сокращения, вместо „физическое тело“ часто говорят просто „тело“.

[2]) „Гамлет“, действие 5, сцена 1.

Вещество и его свойства.

Таким образом, тот „материал“, из которого построен мир, является нам как нечто *всегда существующее*, лишь меняющее свои формы и группировки. Этот материал называется **веществом** или **материей**[1]).

Материя встречается нам в очень большом числе разновидностей. Эти разновидности, каждая сама по себе, часто также называются **материями** или **веществами**. Так, напр., можно говорить о железе, ртути, воде, углекислоте, сахаре, как об индивидуальных веществах.

Материя способна к чрезвычайно разнообразным превращениям. Так, напр., вещества, содержащиеся в воздухе и почве, под действием солнечного света и тепла усваиваются растениями и превращаются в древесину, крахмал, белковые вещества и пр. Число превращений вещества из одной формы в другую, происходящих в природе помимо воли человека, чрезвычайно велико. Но, быть может, не меньше количество тех превращений материи, которые проделываются человеком намеренно на заводах или в лабораториях: либо — ради изготовления каких-нибудь практически-важных веществ (каковы, напр., серная кислота, спирт, различные краски, лекарства), либо просто из любознательности. Подобные превращения изучаются главным образом в **химии**.

В своей культурной деятельности человек широко использует различные вещества и их свойства. Одни вещества он употребляет почти в том виде, в каком они находятся в природе (напр., булыжный камень для мостовых). Другие вещества сначала подвергаются более или менее сложной обработке; примеры: добывание металлов из руд, керосина из нефти. Полученные продукты или прямо пускаются в дело (напр., керосин — для сжигания в лампах, керосиновых кухнях, двигателях), или подвергаются дальнейшей обработке: напр., для того, чтобы изготовить проволоку, прокатывают раскаленную металлическую „болванку“ между валиками, вращающимися в противоположные стороны, а более тонкую проволоку готовят из толстой волочением через ряд последовательно суживающихся отверстий (рис. 1). Но если, напр., такое отверстие будет иметь ненадлежащую форму, то усилие, требуемое для волочения, может оказаться больше, чем сопротивление проволоки разрыву: тогда протягиваемая проволока разорвется. Чтобы избегнуть такого исхода, необходимо, очевидно, изучить, как влияет форма отверстия на требуемое при волочении усилие, и какое усилие могут выдерживать проволоки из различных металлов, не разрываясь.

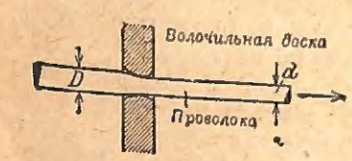

Рис. 1. Изготовление холоднотянутой проволоки.

Подобные вопросы о **свойствах веществ**, — о том, как относятся различные вещества к претерпеваемым ими внешним воздействиям, рассматриваются и решаются в **физике**. Уже из этого примера ясно, какое большое значение должна иметь физика для „обрабатывающей промышленности“.

[1]) Слово *материя* — латинское. По-латыни materia означает *вещество, материал, предмет*.

Но, кроме свойств вещества, человеку в его технической деятельности необходимо знать еще ряд других физических фактов.

Вещество в движении.

Так, человек в широких размерах пользуется **движением**: во всякой машине имеются движущиеся части; есть специальные устройства, цель которых заключается в передвижении с места на место, как автомобили, пароходы, самолеты; жидкости и газы человек заставляет двигаться, между прочим, по трубам (водопроводы, нефтепроводы, газопроводы). Целесообразное осуществление сколько-нибудь сложных движений невозможно без точного знания, как и почему происходят различные движения.

Материя в состоянии движения обладает особой способностью, которой нет у материи, находящейся в состоянии покоя. Движущийся молот, падая на кусок металла, расплющивает его; но если тот же молот будет просто положен на тот же кусок металла, он не произведет в последнем значительных изменений. Точно так же летящая пуля производит разрушительное действие исключительно благодаря тому, что движется с большой скоростью. Вода, вытекая с некоторою скоростью из русла A (рис. 2) и ударяя в лопатки „подливного колеса“, приводит его, в свою очередь, в движение. Мы видим, что движущиеся тела способны приводить в движение другие тела или их части, притом иногда с такой силой, что эти части отделяются друг от друга, — получается разрушительное действие.

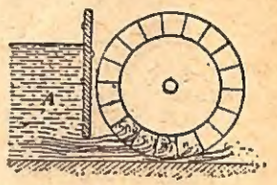
Рис. 2. Подливное колесо.

Кинетическая энергия.

То особенное, что есть у тела в состоянии движения и чего нет у тела в состоянии покоя, называется **кинетической энергией**[1]). Кинетическая энергия, так сказать, „одушевляет“ физические тела и придает им способность действовать известным образом, побеждая сопротивления. Насколько возрастают присущие телу возможности, если снабдить его достаточным запасом кинетической энергии, показывает следующий поразительный опыт. Из обыкновенной бумаги вырезают правильный кружок и, насадив его центрально на ось маленького электромотора, служащего вместо центробежной машины, приводят электромотор с кружком в быстрое вращение. Тогда, поднеся к кружку деревянную дощечку или щепку, мы увидим, что она будет перерезана им, как будто бы кружок был стальным, а не бумажным.

Если движущееся тело останавливается и тем самым теряет свою кинетическую энергию, то взамен ее непременно получается либо кинетическая энергия другого тела (стальной шарик, нале-

[1]) Слово энергия (enérgeia) — греческое и означает *деятельность*. Слово *кинетический* происходит от греческого kinetikòs и значит: *относящийся к движению*.

тевший на другой такой же, но покоящийся шарик, останавливается, а второй шарик начинает двигаться так, как двигался первый), либо — некоторые другие видимые или осязаемые результаты, которым соответствуют особые **энергии**. Эти энергии могут быть вполне или отчасти опять превращены в кинетическую энергию. Превращение различных энергий в кинетическую энергию совершается между прочим в машинах, называемых **двигателями** или **моторами**; можно сказать, что всякий двигатель есть источник кинетической энергии.

Паровая турбина. Рассмотрим наиболее простой по устройству *тепловой* двигатель — **паровую турбину** [1]), изобретенную шведом де-Лавалем (рис. 3). Четыре трубки или, как их называют, *сопла* присоединены к общей трубе, которая ведет к котлу, так что горячий пар из котла под полным давлением вступает в сопла. В соплах он может свободно расширяться; при этом частицы пара с огромной скоростью (около 1000 метров в секунду) попадают на лопатки, устроенные по окружности турбинного колеса, и сообщают ему быстрое вращение (на рисунке — слева направо). Колесо может делать 30000 и больше оборотов в минуту; это — такое число оборотов, какое больше нигде в машиностроении не встречается.

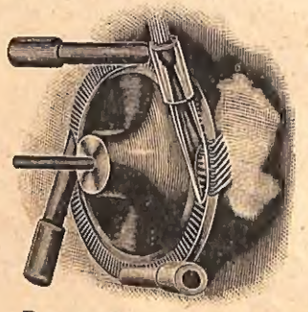

Рис. 3. Паровая турбина.

Тепловая энергия. Очевидно, что колесо турбины получает кинетическую энергию от пара. Правда, покуда пар находится в котле, он вовсе не имеет кинетической энергии. Но зато у него есть особая энергия, называемая **тепловой энергией** или просто **теплотой**. Паровая турбина (и вообще всякий тепловой двигатель) „поглощает" энергию тепловую и взамен того выделяет энергию кинетическую. Отработавший пар всегда бывает холоднее, чем был вначале: это — оттого, что он отдал часть своей теплоты, которая перешла в кинетическую энергию.

Вообще всякое тело имеет некоторый запас тепловой энергии. Тела горячие легко отдают свою тепловую энергию. Но чем холоднее тело, тем труднее извлечь из него имеющуюся в нем теплоту [2]).

Возможно превращение энергии, обратное тому, которое имеет место в паровой турбине: превращение кинетической энергии в тепловую. Это превращение совершается гораздо легче, чем превращение тепловой энергии в кинетическую. Вот пример: если станем ударять молотком по шляпке гвоздя, то гвоздь заметно нагреется. Здесь молоток обладает кинетической энергией,

[1]) От лат. слова túrbo, означающего *все, что вертится, кружится*.

[2]) При весьма низких температурах, близких к 273° холода (по Цельсию), запас теплоты в телах сходит, можно сказать, на-нет.

пока он движется; остановившись при ударе о гвоздь, он теряет кинетическую энергию, но потеря эта не бесследна: взамен потерянной кинетической энергии появляется энергия тепловая. То же бывает при всяком **ударе** тел (также при **трении, сжатии**).

Электрическая энергия. В современной технике имеют большое распространение двигатели *электрические* или „электромоторы". Электромотор начинает вращаться, т.-е. выделяет кинетическую энергию, если через него пропускать электрический ток, т.-е. если питать его особой энергией — **электрической**. Устройство электромоторов чересчур сложно, чтобы нам его рассматривать здесь; мы вместо того рассмотрим общеизвестный прибор, в котором также имеет место превращение электрической энергии в кинетическую: электрический звонок (рис. 4).

Электрический звонок. Посередине мы видим „электромагнит" E, состоящий из куска железа в форме буквы П, с обмоткой из „изолированной" проволоки, переходящей с одной ножки железного П на другую. Один конец обмотки соединен с винтом m, другой — с куском железа („якорем") a, висящим на стальной пружинке и несущим стерженек с металлическим шариком P, расположенным близ колокольчика T. Якорь a внизу соприкасается с упругой пластинкой c, соединенной с винтом n.

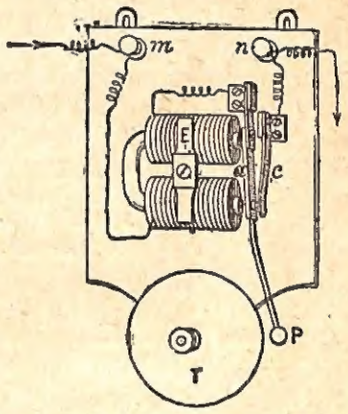

Рис. 4. Электрический звонок.

Пусть мы подвели к винтам m и n проволоки от „полюсов" какого-нибудь источника электрической энергии, напр., гальванического элемента Вольты (полюсами здесь служат медная и цинковая пластинки; они стоят в сосуде, наполненном раствором серной кислоты в воде, при чем жидкость не доходит до верха пластинок). Ток из элемента пойдет, скажем, к винту m, отсюда по обмотке электромагнита к якорю a, отсюда через пластинку c к винту n и, наконец, обратно в элемент. И вот, пока по обмотке электромагнита проходит ток, электромагнит получает свойство притягивать железо к своим концам; поэтому он притянет якорь a, при чем шарик P ударит один раз по колокольчику T. Но вследствие того, что якорь отошел от пластинки c, „цепь разомкнулась", и ток перестает проходить. Тогда электромагнит уже не притягивает якоря, и этот последний снова оттягивается в первоначальное положение пружинкой, на которой он висит. Тем самым восстанавливается соприкосновение или „контакт" между a и c, вследствие чего ток опять имеет возможность пройти по цепи, и все повторяется, как было рассказано раньше. — При каждом „замыкании" цепи раздается один удар шарика P по колокольчику T. Если замыкания

и размыкания цепи правильно повторяются, звонок все время звонит.

Повторяющиеся движения якоря и шарика Р то в ту, то в другую сторону ясно показывают, что мы имеем здесь развитие кинетической энергии. Она образуется на счет затрачиваемой энергии электрического тока.

Добывание электрической энергии.

Можно, наоборот, получить электрическую энергию, расходуя кинетическую. Такое превращение осуществляется в широких размерах в промышленности с помощью так называемых **динамомашин**. Динамомашины устраиваются так же, как электромоторы, но действуют в обратном смысле: динамомашину необходимо вращать, — тогда она дает ток в цепи, в которую она включена.

Наука стоит на той точке зрения, что **энергия не создается и не пропадает** [„закон[1]) сохранения энергии“]. Интересно задать вопрос: откуда же берется тепловая энергия в примере паровой турбины? откуда берется энергия электрическая в примере электрического звонка, питаемого элементом?

Химическая энергия.

Ответ будет общий для обоих случаев. В топке парового котла, где развивается тепловая энергия, и в элементе, где развивается энергия электрическая, происходят химические превращения веществ, а именно: в топке горючее (напр., уголь) соединяется химически с кислородом воздуха; в элементе серная кислота действует химически на цинк. В результате этих „реакций“ тратится горючее, тратится серная кислота и цинк, и в то же время *расходуется присущая этим веществам особая энергия* — **химическая**. Вообще всякое химическое превращение вещества неразрывно связано с превращением энергии, при чем в одних случаях (как это было выше) химическая энергия действующих друг на друга веществ затрачивается, взамен чего получается иной вид энергии, а в других случаях, наоборот, количество химической энергии возрастает на счет подводимой извне энергии какого-нибудь другого вида. Так, пропуская электрический ток через воду, подкисленную серной кислотой, можно получить химически-простые вещества, из которых состоит вода, т.-е. кислород и водород: здесь расходуется энергия электрическая, а взамен ее получается химическая энергия кислорода и водорода.

Лучистая энергия.

Из наиболее важных видов энергии упомянем еще один, а именно так называемую **лучистую энергию**, или короче — **свет**. Что свет есть форма энергии, видно из того, что он может превращаться в другие виды энергии, напр., в тепловую; всякий знает, как сильно могут нагреваться темные тела (напр., камни),

[1]) Законом в физике и вообще в естественных науках называется правильное, постоянное соотношение между явлениями природы, не могущее быть измененным через вмешательство человеческой воли. Напр.: тело, на которое не действуют силы, либо покоится, либо движется равномерно по прямой линии; освещенность поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника света; электрическое сопротивление провода прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения.

когда они поглощают солнечные лучи. В живой природе огромную роль играет превращение лучистой энергии в химическую. Такое превращение имеет место в зеленых частях растений, при чем происходит разложение воды и углекислоты.

Что касается добывания лучистой энергии (света), то наиболее легкий и чаще всего встречающийся на практике способ такого добывания, это — накаливание тел до высокой температуры, т.-е. использование тепловой энергии. Эта последняя, в свою очередь, получается или из химической энергии (при горении керосина, стеарина, светильного газа), или из электрической энергии, как, напр., в лампах накаливания (очень тонкий металлический волосок при прохождении тока через него сильно нагревается).

Превращения энергии.

Рассмотрим довольно длинный ряд последовательных превращений энергии, часто применяемый в работе „электрических станций“.

Топливо	химическая энергия
сжигается в топке; вода в котле нагревается и обращается в горячий пар,	тепловая энергия
который, проходя через турбину, заставляет вращаться колесо; турбина вращает динамомашину,	кинетическая энергия
которая дает электрическ. ток, распределяемый по проводам и питающий	электрическая энергия
электродвигатели	кинетическая энергия
и электрические лампы.	тепловая энергия световая энергия.

Мы видим из предыдущих примеров, что энергия имеет важное значение при объяснении хода явлений[1]). Нет ни одного явления в природе, которое бы не сопровождалось или превращениями энергии из одной формы в другую, или хотя бы движением ее. „Движение энергии“ происходит, когда энергия меняет место. Это бывает, напр., при движении тел (тело, двигаясь, переносит с места на место свою кинетическую энергию), также — при распространении световых лучей.

Физика и химия.

Науки, которые прослеживают различные движения и превращения материи и энергии и изучают происходящие при этом явления, называются **физико-химическими**.

Физико-химические науки распадаются на две главные ветви: **физику** и **химию**.

[1]) Явлением называется всякая перемена, происходящая в природе.

Физика [1]) изучает общие свойства вещества и те явления, в которых участвуют следующие виды энергий: кинетическая, тепловая, электрическая, лучистая. Эти явления называются **физическими.**

Химия [2]) занимается преимущественно теми явлениями, при которых вещество тел подвергается резким, глубоким изменениям. Эти явления называются **химическими.** В этих явлениях всегда фигурирует химическая энергия.

Все же провести резкую границу между физикой и химией невозможно. Есть много явлений, рассмотрение которых входит одновременно в физику и в химию.

Физика делится на несколько отделов. Каждому из отделов соответствует один вид энергии, играющий главную роль в тех явлениях, которые в данном отделе рассматриваются.

Так, изучение явлений движения, его причин и следствий составляет предмет **механики** [3]). Здесь важное место принадлежит кинетической энергии.

В близкой связи с механикой излагается отдел об общих свойствах вещества.

Из механики иногда выделяют в особый отдел учение о тех движениях мелких частиц воздуха и других тел, которые, действуя на наше ухо, производят звуковые ощущения. Этот отдел зовется **акустикой** [4]).

Тепловые явления и тепловая энергия изучаются в **термологии** [5]).

Электрические (а также близкие к ним магнитные) явления и электрическая энергия изучаются в **электрологии.**

Наконец, световые явления и лучистая энергия составляют предмет **оптики** [6]).

Так как разновидности энергии постоянно превращаются одна в другую, то и физические явления, принадлежащие к различным областям физики, часто бывают тесно сплетены между собой. Поэтому между различными отделами физики существует тесная связь.

---

[1]) От греческого слова physis = *природа.*

[2]) Происхождение древнего слова *химия* не вполне ясно. Всего вероятнее, что оно происходит от египетского слова кеме = *Египет*; таким образом *химия* — все равно, что „египетская наука".

[3]) От греческого слова mechané = *машина.*

[4]) От греческого слова akúo = *слышу.*

[5]) От греческих слов thermós = *теплый*, lógos = *учение.*

[6]) От греческого слова opténo = *вижу.*

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ.

Общие механические понятия.

ГЛАВА I.

Меры протяженности.

§ 1. Физика принадлежит к числу так называемых *точных* наук: это значит, что она выражает свои данные числами, а свои законы — формулами математики. Числа в физике обыкновенно являются результатами измерения различных физических величин. Поэтому необходимо твердо усвоить употребляемые в физике меры и способы измерения физических величин.

§ 2. Меры длины или линейные.—За основную меру (единицу) длины принят метр [1]) или **длина, которую при температуре таяния льда имеет платиновая линейка, изготовленная комисией французских ученых в конце XVIII века и хранящаяся в государственном архиве Франции.** Линейка эта называется **прототипом** [2]) **метра.**

С прототипа были изготовлены точнейшие копии, называемые **эталонами** [3]) **метра,** и распределены между различными государствами.

Метр почти равен одной сорокамиллионной части земного меридиана [4]).

Метр сокращенно обозначается французской буквой m.

В следующей таблице указаны десятичные кратные метра и десятичные подразделения его, вместе с их сокращенными обозначениями. Меры наиболее важные отмечены жирным шрифтом.

1 километр	(km)	= **1000**	m
1 эктометр		= 100	m
1 декаметр		= 10	m
1 десиметр	(dm)	= **0.1**	m
1 сантиметр	(cm)	= **0.01**	m

---

[1]) От греч. слова métron = *мера.*

[2]) Прототип = *первичный образец* (от греч. слов prótos = *первый*, typos = *образец*).

[3]) Франц. слово étalon значит *образцовая мера.*

[4]) Длина меридиана в действительности составляет около 40008000 метров. Отсюда легко высчитать, что сорокамиллионная часть меридиана равна 1.0002 m, или что метр на $^1/_{50}$ миллиметра менее, чем сорокамиллионная часть меридиана.

1 миллиметр (mm) = **0.001** m
1 микрон (μ) = **0.000 001** m = **0.001** mm [1]).

Необходимо знать следующие приблизительные соотношения „метрических“ мер длины с прежними российскими мерами.

1 m = $22^1/_2$ вершка = 1.4 аршина
1 верста = $^{16}/_{15}$ km,
1 аршин = 71 cm,
1 дюйм = 2.5 cm [2]).

§ 3. Те, кому не случалось производить тщательных измерений длины, с большой пользой для себя проделают следующую **лабораторную работу № 1:** *определить число* π *или отношение окружности к диаметру.*

Необходимые предметы: 1) деревянный кружок; 2) метровый масштаб с миллиметровыми делениями; 3) карандаш, остро очиненный.

Способ выполнения. I. Измерения. *А. Измерение окружности.*

1) Отметить точку А на окружности кружка, проводя *тонкую* черточку на одном из его оснований.

2) Поставить кружок на метровый масштаб так, чтобы точка А как раз совпадала с какой-нибудь чертой В масштаба, соответствующей целому числу сантиметров (рис. 5); записать нумер этой черты. Затем осторожно катить кружок *(без скольжения)* вдоль масштаба, пока точка А опять не будет лежать на масштабе. Записать новое положение ее (С) *в сантиметрах*, отсчитывая сначала целые сантиметры, потом миллиметры (записываются на месте десятых долей сантиметра) и, наконец, десятые доли миллиметра [3]) (записываются на месте сотых долей сантиметра).

Рис. 5.

3) Разность между этим отсчетом и первоначальным даст длину окружности.

---

[1]) Приставки *кило, экто, дека* происходят от греческих слов chilioi — *тысяча*, hekatòn = *сто*, déka = *десять;* они употребляются в названиях *кратных* мер. Приставки *деси, санти, милли* происходят от латинских слов décem — *десять*, centum = *сто*, mille = *тысяча*, и употребляются для обозначения *десятой, сотой, тысячной доли* какой-либо основной меры. Название *микрон* произошло от греч. слова mikrós = *малый*.

[2]) Более точные соотношения:

1 m = 22.498 вершка = 1.4061 аршина
1 верста = 1.0668 km,
1 арш. = 71.12 cm,
1 дюйм = 2.540 cm.

[3]) Десятые доли миллиметра отсчитываются на-глаз. При таких отсчетах полезно иметь в виду следующие указания. Всего легче отсчитываются 0.5 — половина миллиметра; 0.4 составляют величину немного меньшую, а 0.6 — немного большую, чем 0.5; 0.2 — немного меньше, а 0.3 — немного больше, чем 0,25 или $^1/_4$; 0.1 — немного менее, чем 0,2 или $^1/_5$, и т. д.

4) Повторить №№ 2—3 еще четыре раза, начиная катание кружка всякий раз от иной черты масштаба. Взять *среднее* из высчитанных согласно № 3 пяти разностей и принять это среднее за длину окружности кружка.

Б. Измерение диаметра. 5) Положив кружок на стол, поместить на него масштаб, как показано на первом из рис. 6, и притом так, чтобы разделенное ребро масштаба совпадало с диаметром кружка, а какая-нибудь черта, соответствующая целому числу сантиметров, совпадала с одним концом этого диаметра. Измерить диаметр, отсчитывая на-глаз десятые доли миллиметра.

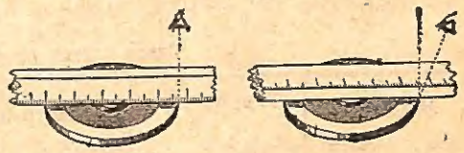

Рис 6.
Правильный способ отсчета. Неправильный способ отсчета.

6) Повторить № 5 еще четыре раза, каждый раз измеряя иной диаметр. Из пяти полученных значений взять среднее и принять это среднее за длину диаметра кружка.

II. Вычисления. Иметь в виду следующие **правила действий над приближенными числами:**

В числовом результате каждого отдельного измерения последняя цифра получена из отсчета, сделанного на-глаз, а следовательно, не вполне достоверна.

При вычислении средних определяют в них одной цифрой больше против того, сколько было цифр в результатах отдельных измерений. Эта лишняя цифра, конечно, будет также не вполне достоверна.

При умножении или делении приближенных чисел определяют в произведении или частном столько *значащих цифр*, сколько их имеется в том из данных чисел, которое обладает меньшим количеством значащих цифр. В число значащих цифр не входят нули, стоящие впереди десятичной дроби. Поэтому, напр., каждое из чисел: 410, 0.503, 7.06, 0.00 280 имеет три значащих цифры.

7) Соблюдая эти правила, найти отношение средних величин окружности и диаметра.

III. Процентная ошибка результата умножений и делений. Выясним правило вычисления процентной ошибки на следующем примере. Пусть некоторая величина вычисляется по формуле $x = \frac{a \times b}{c}$, где истинные значения измеряемых величин a, b, c, допустим, таковы: a = 200, b = 1000, c = 100, откуда истинное значение x = 2000. Так как всякое измерение вообще сопровождается погрешностью, то на самом деле пусть получились для a, b, c иные значения, а именно: a = 202 (погрешность равна $+1^0/_0$ измеряемой величины), b = 1005 (погрешность $+0.5^0/_0$) c = 99.5% (погрешность $-0.5^0/_0$). Отсюда для x получится

$\frac{202 \times 1005}{99.5} = 2040$ с некоторой дробью, т.-е. приблизительно на $2^0/_0$ больше против истинного значения.

Таким образом мы видим, что *процентная ошибка результата умножений и делений приблизительно равна арифметической сумме процентных ошибок всех множителей и делителей.* (В нашем примере $2^0/_0 = 1^0/_0 + 0.5^0/_0 + 0.5^0/_0$.)

Схема записи результатов.

№ опыта	Окружность в cm	Диаметр в cm
1		
2		
3		
4		
5		
	Среднее =	Среднее =

$\pi = \frac{\text{окружность}}{\text{диаметр}} = \ldots$

(Истинное значение=3.1416.)

Абсолютная ошибка = ...

Процентная ошибка $= \frac{\text{абс. ошибка}}{\pi} \times 100 = \frac{\text{абс. ошибка}}{0.0314} = \ldots$

Вопросы: 1. Как велика будет процентная ошибка в диаметре при „абсолютной" погрешности в 0.01 cm?

2. Как велика будет процентная ошибка в окружности при абсолютной погрешности, равной 0.02 cm?

3. При этих условиях какая процентная ошибка получается в величине π?

§ 4. Верньер. Раздвижной калибр. — Для верного отсчитыванья десятых долей самого мелкого деления масштаба служит приспособление, называемое *верньером или нониусом*[1]).

Пусть cd (рис. 7) будет масштаб, ab — предмет, длину которого измеряют; длина af соответствует некоторому целому числу

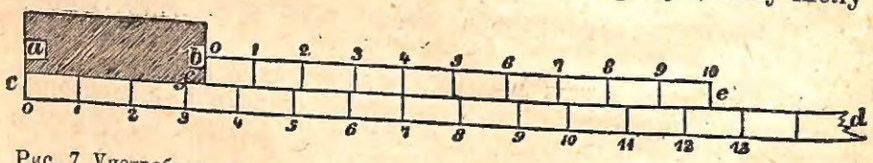

Рис. 7. Употребление верньера: ab—измеряемая длина, cd—масштаб, be—верньер.

делений масштаба, отрезок fb—некоторому целому числу десятых долей. Приложим вслед за ab линейку be (это и есть верньер), *десять* делений которой равны *девяти* делениям масштаба; значит каждое деление верньера равно $^9/_{10}$ одного деления масштаба. Некоторая черта верньера (на рисунке—4-ая) совпадает с некоторой (на рисунке — 7-ой) чертой масштаба. Очевидно, что расстояние между 3-ей чертой верньера и 6-ой чертой масштаба равно $^1/_{10}$ деления масштаба, расстояние между 2-ой чертой верньера и 5-ой чертой масштаба — $^2/_{10}$, расстояние между 1-ой чертой верньера и 4-ой чертой масштаба — $^3/_{10}$, наконец, расстояние между нулевой чертой верньера и 3-ьей чертой масштаба, т.-е. отрезок fb равняется $^4/_{10}$ деления масштаба. Отсюда вытекает *правило:* **искомое число десятых долей указывается нумером той черты верньера, которая совпадает с чертой масштаба.**

[1]) Название *верньер* и *нониус* суть собственные имена лиц, изобретших это приспособление. Нем. слово Maassstab = *мера, мерило.*

Верньер входит в состав многих измерительных приборов, из которых назовем „раздвижной калибр"[1]) или штангенциркуль[2]), изображенный на рис. 8 и употребляемый для измерения размера разных предметов. Когда ножки, служащие для охватывания измеряемого предмета, сдвинуты вплотную, нулевая черта масштаба совпадает с нулевой чертой верньера. Если раздвинем калибр на некоторое расстояние, то нуль верньера отодвинется от нуля масштаба на такое же расстояние.

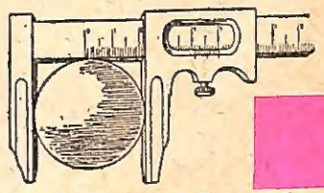

Рис. 8. Раздвижной калибр.

§ 5. Дыромер. — Для измерения диаметров дырок или трубок (напр., отверстия ружейных стволов на оружейных заводах) употребляется „дыромер", имеющий вид острого угла (рис. 9). На стороне угла нанесены миллиметровые деления. Ширина дыромера в разных местах пропорциональна расстоянию от вершины угла. Таким образом, если, напр., на расстоянии 10 cm от вершины ширина прибора будет 10 mm, то и *всюду* ширина составляет столько же миллиметров, сколько сантиметров составляет расстояние от вершины угла. Поэтому, вдвигая дыромер плотно в какое-нибудь отверстие, мы можем определить ширину отверстия до сотых долей миллиметра.

Рис. 9. Дыромер.

§ 6. Винтовой калибр. — Запасшись каким-нибудь цилиндрическим предметом (напр., стаканом), вырежем из бумаги прямоугольный треугольник, один катет которого был бы равен окружности нашего цилиндра, а другой катет был бы значительно меньше первого. Навернем этот треугольник на цилиндр так, чтобы длинный катет совпадал с окружностью цилиндра; тогда гипотенуза расположится по одному полному обороту „винтовой линии", а короткий катет, совпадающий с образующею цилиндра, укажет нам „шаг винта".

Зная такое происхождение винтовой линии, мы легко поймем (аналогия с дыромером!), что винт в своей „гайке" подви-

[1]) Слово *калибр* происходит от старо-испанского слова calibo = *диаметр.*

[2]) По-немецки Stange значит *прут.*

гается вдоль оси на такую же часть шага, на какую часть полного оборота повернут винт около оси.

На этом основано употребление *винтового калибра* (рис. 10), служащего для измерения толщин (напр., диаметра проволок)[1]. Одно деление скалы ec[2]) равняется шагу винта s. Обыкновенно шаг винта составляет $^1/_2$ mm. Поэтому при одном полном обороте головки h расстояние „щек" ab изменится на $^1/_2$ mm; а при повороте h на одну пятидесятую долю полного оборота, ab изменится на $^1/_2 \times {}^1/_{50} = 0.01$ mm. Итак, если окружность d разделена на 50 делений, то каждое деление соответствует изменению ab на 0.01 mm.

Желая произвести измерение, надо сначала убедиться, что при соприкосновении щек a и b (при чем большой и указательный пальцы, держащие головку h с *легким* давлением, только скользят по ней, но не двигают ее дальше) нуль разделенной окружности приходится как-раз на линии ec (если же нет, надо соответственно подвинтить a); затем вставить измеряемый предмет и вращать головку, пока предмет не будет соприкасаться с a и b (пальцы должны давить на головку с той же силой, как при проверке нуля). Наконец, по скале ec отсчитать миллиметры и полумиллиметры, а по окружности d — сотые и тысячные доли миллиметра.

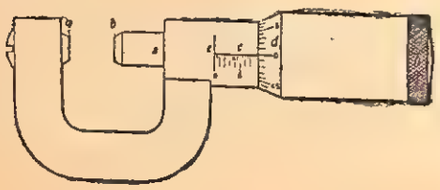

Рис. 10.

§ 7. Постоянные калибры. — Уже давно оружейники, машиностроители и изготовители различных орудий труда пришли к заключению, что выгоднее изготовлять части машин, орудий и т. д. очень акуратно по заданным размерам: при сборке тогда нет надобности вновь пригонять части одну к другой, и потребитель легко может заменить сломавшуюся часть новой частью. Поэтому в производстве широко употребляются наборы калибров, из которых каждый соответствует одному строго определенному размеру. Эти калибры представляют собой пластинки из твердой стали; форма их показана на рис. 11. „Хвост" такой пластинки имеет ширину в определенное число миллиметров, а между параллельными внутренними поверхностями „лапок" расстояние пригнано ровно к такому же числу миллиметров.

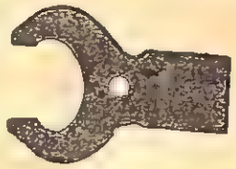

Рис. 11.

Так как не всегда нужна наибольшая возможная точность работы, то делают подобные калибры также двойными: оба конца

[1]) Винтовой калибр иначе называют „пáльмером" (по имени изобретателя).

[2]) *Скáла* или *шкáла* — название разделенной линейки. Происходит от латинского scálae = *лестница*.

устроены одинаково, но один шире, другой уже определенной меры на величину позволительного „допуска". Положим, напр., что шейка вала должна иметь диаметр 40 mm, с отклонением не более 0.01 mm в ту или другую сторону. Тогда одно отверстие калибра делается на 0.01 mm больше 40 mm, а другое — на столько же меньше. Если диаметр испытуемой шейки находится в должных пределах, то шейка свободно пройдет чрез одно отверстие, а чрез другое не пройдет (рис. 12). Но если шейка проходит через оба отверстия, или не проходит ни через одно, то значит она или слишком тонка, или слишком толста, и бракуется.

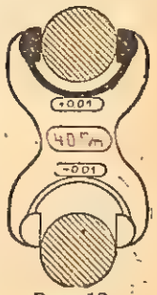

Рис. 12.

§ 8. Меры площади. — **За единицу площади принимается площадь квадрата, сторона которого равна линейной единице.** Такие единицы площади называются **квадратными.** Так, напр., **квадратный сантиметр есть площадь квадрата, имеющего сторону, равную** (линейному) **сантиметру.**

Для нахождения соотношений между квадратными мерами надо помнить следующее математическое правило: **отношение двух каких-нибудь квадратных единиц равно квадрату отношения соответствующих им линейных единиц.**

На этом основании:

1 кв. метр (сокращенное обозначение m^2) = 100 кв. дециметрам (dm^2). Точно так же:

$$1\ dm^2 = 100\ cm^2,$$
$$1\ cm^2 = 100\ mm^2.$$

§ 9. Измерение площадей. — Для определения площади какой-нибудь плоской фигуры (напр., изображения земельного участка на плане) можно положить на данную фигуру прозрачную „миллиметровую" бумагу и сосчитать число кв. сантиметров и кв. миллиметров, занятых площадью фигуры.

Та же цель достигается быстрее посредством прибора, называемого *планиметром*[1]). Установив одну точку планиметра неподвижно и проведя другую его точку вдоль всего контура данной фигуры, узнаем площадь по показанию счетчика, входящего в состав прибора.

Если данная фигура имеет правильную геометрическую форму (как прямоугольник, трапеция, треугольник...), то измерение ее сводится к измерению линейных величин, на основании известных геометрических правил.

§ 10. Меры объема. — **За единицу объема принимается объем куба, ребро которого равно линейной единице.** Такая единица объема называется **кубической.** Напр., **кубический сантиметр есть объем куба, ребро коего равно сантиметру.**

[1]) От лат. слова plánum = *плоскость* и греч. слова metró = *меряю*.

Отношение двух кубических мер равно кубу отношения соответствующих им линейных мер. Так:

1 куб. метр (сокращенное обозначение m^3) = 1000 куб. десиметров (dm^3),

$$1\ dm^3 = 1000\ cm^3,$$
$$1\ cm^3 = 1000\ mm^3.$$

Кубический сантиметр часто называют для краткости **кубиком.**

Когда пользуются **кубическим десиметром,** как мерою объема жидкостей и газов, то обыкновенно называют его **литром**[1]) (сокращенное обозначение l). Итак, запомним:

1 литр содержит 1000 cm^3.

§ 11. Измерение объемов. — Для определения объема жидкостей и газов пользуются измерительными цилиндрами: **мензурками**[2]), **бюретками**[3]), рис. 13a и 13b, „градуированными“[4]) в куб. сантиметрах или их кратных. Для отмеривания жидких веществ пользуются также измерительными склянками или колбами (рис. 14), имеющими определенную вместимость (считая до черты, нанесенной на шейке).

Рис. 13a. Измерение объема жидкости с помощью мензурки.

Рис. 14. CC (или Ccm) означает то же, что cm^3.

Рис. 13b. Бюретка.

Можно также воспользоваться мензуркой для определения объема твердого тела. Для этого, налив в мензурку жидкости до произвольного деления, замечают объем налитой жидкости; потом погружают в нее твердое тело и замечают, какой объем занят жидкостью и твердым телом вместе; наконец, вычитанием определяют объем погруженного тела[5]).

---

[1]) Слово *литр* происходит от названия одной византийской (и древнерусской) меры. — Между литром и куб. десиметром на самом деле есть некоторая разница. Но она так мала, что мы можем на нее не обращать внимания. См. § 34.—Русское ведро равно приблизительно 12 (точное 12.30) литрам.

[2]) От латинского слова mensura = *мера.*

[3]) Французское слово burette означает *сосудец, склянка.*

[4]) Градуировать (от лат. слова grádus = *ступень*) значит *наносить деления,* имеющие равное значение.

[5]) Этот способ основан на так называемой **непроницаемости** вещества („два тела не могут занимать в одно время одну и ту же часть пространства“). Тело, погруженное в жидкость, *смещает* или *вытесняет* такой же объем жидкости, какой занимает само.

Когда измеряемый объем имеет правильную форму (напр., форму призмы, цилиндра, шара...), тогда его измерение сводится к измерению линейных размеров и последующему вычислению по известным геометрическим формулам.

§ 12. Лабораторная работа № 2. — *Найти емкость цилиндрического сосуда.*

Необходимые предметы: 1) цилиндрический сосуд (напр., внутренний сосуд калориметра), 2) метровый масштаб.

Способ выполнения. 1) Измерить метровым масштабом глубину L сосуда в трех местах, с точностью до десятых долей миллиметра, и взять из полученных значений среднее.

2) Измерить *внутренний* диаметр D сосуда, как в § 3, № 5. Повторить измерение три раза и взять среднее.

3) Вычислить емкость сосуда V по формуле $\frac{\pi D^2}{4} \times L$ или $\pi R^2 L$ (где R — радиус). (Объем цилиндра = площади основания, умноженной на высоту.) При вычислении соблюдать правила § 3, II.

Замечание. Вычисляя объем по формуле $V = \pi R^2 L$, мы перемножаем четыре множителя (π, R, R, L), из коих первый — отвлеченное число (отношение длин), а остальные три — именованные числа, выражающие некоторые длины. Для арифметики перемножение именованных чисел друг на друга является делом запретным, в физике же это действие постоянно применяется. Выведем правило этого действия. Пусть, напр., R = 10 cm, L = 20 cm. Тогда $V = 3.1416 \times 10\ cm \times 10\ cm \times 20\ cm = 6283\ cm^3$. Мы видим, что нам пришлось числовые значения перемножить обычным порядком, и, кроме того, **из наименований сомножителей составить наименование произведения так, как если бы эти наименования были алгебраическими количествами** ($cm \times cm \times cm = cm^3$).

Проверка. 4) Если имеется мензурка (или хотя бы измерительная склянка), проверить найденный результат, наливая в данный сосуд воду из мензурки.

Вопросы. 1) Если истинное значение длины диаметра есть 10 cm, а полученное при измерении — 10,1 cm, то как велика будет процентная ошибка в площади основания?

2) Если при измерении диаметра сделана ошибка в 0.5%, то как велика будет процентная ошибка в площади основания?

3) Приблизительно сообразить величину возможной абсолютной погрешности в L и D (сравнивая результаты отдельных измерений между собой) и вывести отсюда процентную погрешность в объеме.

Схема записи.

	1-е набл.	2-е набл.	3-е набл.	Среднее
Глубина цилиндра =	. . . cm;	. . . cm;	. . . cm;	. . . cm.
Внутрен. диаметр =	. . . cm;	. . . cm;	. . . cm;	. . . cm.

$$\text{Объем} = \frac{\pi D^2}{4} \times L = \pi R^2 L = \ .\ .\ .\ .\ cm^3.$$

ГЛАВА II.

Измерение сил и масс.

§ 13. Что такое механическая сила?— На рис. 15 изображено, как человек поднимает (или по крайней мере поддерживает в равновесии) тяжелый груз при помощи „рычага“, т.-е. стержня, опирающегося в одном месте на подставку. Груз стремится двигаться вниз и *тянет* вниз правый конец рычага; человек противодействует этому, *толкая* вниз левый конец. Опора, на которой лежит рычаг, испытывает от рычага *давление*.

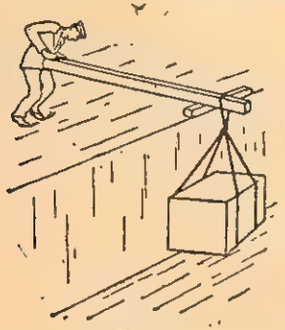

Рис. 15.

Всякая *тяга (притяжение)*, всякий *толчок*, всякое *давление* называются **механическими силами**, независимо от того, каков источник этих действий. Поэтому, напр., притяжение куска железа к магниту также представляет собой механическую силу.

Для краткости механические силы называются просто **силами**[1]).

§ 14. Результаты действия сил: изменение движения тел и изменение формы тел.—Присутствие силы, действующей на тело, может наглядно сказываться двумя способами.

Во-первых, сила может *изменить состояние движения* тела, напр., остановить движущееся тело, привести в движение покоящееся тело, сделать движение тела более быстрым или более медленным. Частные примеры на это легко придумать хотя бы для случая, показанного на рис. 15.

Во-вторых, сила может вызвать *изменение формы* тела, на которое она действует. Так, не подлежит сомнению, что рычаг на рис. 15 должен претерпеть некоторое *гнутие*.

§ 15. Сила веса. Отвес. — Подобно тому, как магнит притягивает железо, так земной шар притягивает к себе все тела. Поэтому-то тяжелое тело, лишенное поддержки, *падает* на землю; будучи положено на какую-нибудь подставку, оно *давит* на нее; будучи подвешено посредством шнурка, оно *натягивает* его.

Давление, производимое телом на неподвижную подставку, или натяжение нити, на которой тело висит, называется **силой тяжести** или **силой веса**[2]).

---

[1]) Здесь не дается краткого определения силы, так же как не даются определения длины или времени.

Часто встречающееся в учебниках определение „сила есть причина движения“ неудовлетворительно, во-первых, потому, что оно нисколько не научает нас, как *измерить* силу (а это — самое главное), во-вторых, потому, что сила бывает не только причиной, но и **следствием** движения (напр., сила трения).

[2]) Ее называют также просто *весом*; но такого названия лучше избегать, потому что слово *вес* чаще употребляется как синоним *массы*.

Наши мускульные ощущения дают нам непосредственно представление о силе веса, когда мы держим какой-нибудь груз на ладони или, напр., удерживаем чемодан за ушки в вытянутой вертикально руке. Вскоре мы ознакомимся со способом точного измерения силы веса и вообще механических сил.

Рис. 16. Вертикальные направления в разных местах земного шара.

Нить, натянутая грузом, принимает определенное направление по отношению к земному шару. Это направление называется **вертикальным**[1]) или **отвесным** (рис. 16).

На этом свойстве силы тяжести основано устройство **отвеса** — прибора, служащего для установки какой-нибудь линии в вертикальном направлении. Отвес состоит из нити и привязанного к ней небольшого грузика (рис. 17).

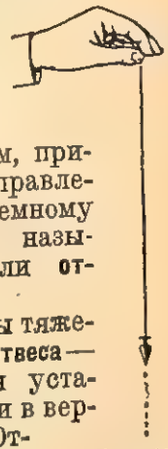

Рис. 17. Отвес.

§ 16. Лабораторная работа № 3. — *Установить данную линию в вертикальном направлении.*

Способ выполнения. — Имеется доска M (рис. 18), опирающаяся на стол посредством трех подставляемых под нее клинышков A, B, C; требуется установить ее так, чтобы начерченная на ней линия ab была вертикальна, т.-е. чтобы ab сделалась параллельной нити отвеса, привешенного у точки a.

Сначала мы, оставляя клинышек A неподвижным, вдвигаем или выдвигаем клинышки B и C так, чтобы плоскость M сделалась вертикальною (мы узнаем это по тому, что нить отвеса будет во всех точках на одинаковом расстоянии от M); затем, оставляя B и C неподвижными, перемещаем клинышек A, пока ab не будет лежать в одной плоскости с нитью отвеса (в этом мы убедимся, закрыв один глаз, а другим смотря перпендикулярно к доске: нить отвеса должна закрывать собой линию ab).

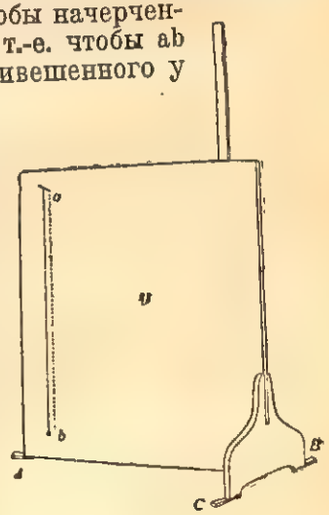

Рис. 18.

Замечание 1. Если доска M покрыта сетью прямых линий, параллельных и перпендикулярных линии ab, устанавливаемой в вертикальном направлении, то все линии, параллельные ab, будут также вертикальны, а все перпендикулярные к ab будут горизонтальны.

Замечание 2. Многие физические приборы, для правильного действия их, должны быть установлены строго вертикально. Обыкновенно для этого служат

---

[1]) От лат. слова vertex = *вершина, высшая точка.*

„установочные винты“, которые, подобно клинышкам в работе № 3, позволяют поднимать или опускать ту или другую точку основания прибора. Три таких установочных винта можно видеть, напр., на рис. 24, изображающем точные весы.

§ 17. Ватерпас. Уровень. — *Ватерпас* [1]) есть прибор, которым пользуются при плотничных, столярных, модельных [2]) и других работах для установки частей в *горизонтальном* [3]) положении. Он состоит из отвеса, соединенного с доскою или рамою ABC (рис. 19) таким образом, что линия AB (по которой ватерпас соприкасается с поверяемой плоскостью) принимает горизонтальное положение, когда кончик грузика E попадет на метку D. При этом угол между CE и AB будет прямой.

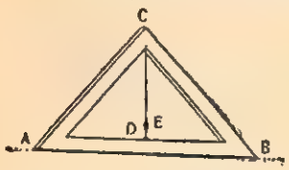

Рис. 19. Ватерпас.

Плоскость, в которой лежат две пересекающиеся горизонтальные линии, сама будет горизонтальна. Поэтому, если мы, ставя ватерпас на данную плоскость в двух различных направлениях, видим, что грузик оба раза приходится против метки D, то заключаем, что наша плоскость горизонтальна.

Уровень, как и ватерпас, служит для установки линий в горизонтальном направлении, но обладает гораздо большей чувствительностью, чем ватерпас, и потому является составною частью многих точных приборов. Уровень (рис. 20) представляет собою стеклянную трубку с жидкостью (эфиром), заключенную в металлическую оправу. Трубка наполнена жидкостью почти вся, за исключением лишь небольшого пузырька; форма трубки — *не цилиндрическая, а слегка искривленная*, и своей выпуклостью трубка обращена кверху; пузырек занимает самое высокое место внутри трубки. Когда уровень помещен горизонтально, тогда пузырек располагается посредине трубки, так что металлический поясок, составляющий часть оправы, проходит как-раз через середину пузырька. Если уровень не горизонтален, пузырек сдвигается к той стороне прибора, которая помещена выше другой.

Рис. 20. Уровень.

§ 18. Единицы для измерения сил. — Осуществление единиц силы основано на том факте, что **сила веса какого-нибудь количества вещества пропорциональна этому количеству**; другими словами, если мы положим на подставку вместо одного куска определенного вещества два таких куска, то и давление на подставку увеличится вдвое.

Поэтому поступают так: силу веса определенного куска вещества принимают за единицу; затем изготовляют куски, содер-

[1]) Искаженное англ. слово waterpoise = *водомер*.
[2]) Подразумевается изготовление (обыкновенно из дерева) моделей машин и частей машин. По этим моделям потом производится отливка из чугуна, стали или меди.
[3]) Слова *горизонт, горизонтальный* происходят от греческого horizo = *ограничиваю*.

жащие в 10, 100,... раз больше и во столько же раз меньше вещества, чем первый кусок; сила веса этих кусков даст нам единицы силы, которые будут в 10, 100,... раз крупнее и в 10, 100,... раз мельче, чем основная единица. Таким образом каждая мера силы имеет своим наглядным представителем определенный кусок вещества. Эти куски называются *гирями* или *разновесками* (рис. 21).

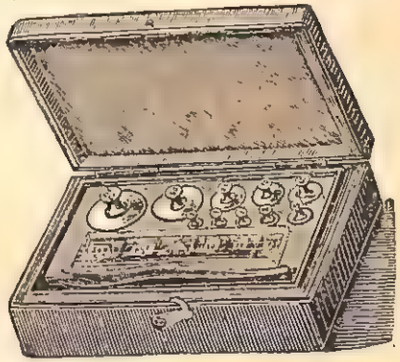
Рис. 21. Разновески.

В технике для измерения сил весьма часто употребляется единица, называемая *килограммом* [1]) или сокращенно — *кило*. **Килограмм есть та сила, с которой давит на подставку платиновый цилиндр, изготовленный в конце XVIII века, находящийся в Париже и хранящийся в архиве вместе с прототипом метра.** Этот цилиндр называют **прототипом килограмма.**

Грамм есть тысячная часть килограмма.

В следующей табличке показана совокупность мер силы, стоящих в десятичном отношении к килограмму и грамму. В скобках указано сокращенное означение каждой меры. Наиболее важные меры отмечены жирным шрифтом.

	1 грамм (g)			**1 грамм (g)**	
1 декаграмм	= 10 g		**1 десиграмм (dg)**	= **0.1** g	
1 эктограмм	= 100 g		**1 сантиграмм (cg)**	= **0.01** g	
1 килограмм (kg)	= **1000** g		**1 миллиграмм (mg)**	= **0.001** g	
1 тонна [2]) **(t)**	= **1000 kg**				

Необходимо усвоить следующие приблизительные соотношения „метрических“ мер силы с прежними русскими мерами:

1 kg = $2^1/_2$ фунта,	1 фунт = 400 g,
1 g = $^1/_4$ золотника,	1 золотник = 4 g,
1 t = 60 пудов,	1 пуд = 16 kg [3]).

§ 19. Динамометры. — Для измерения величины сил служат приборы, называемые **динамометрами** [4]) (силомерами). Главную часть всякого динамометра составляет градуированная (т.-е. снабженная делениями, равными по своему значению) пружина.

[1]) Grámma — название одной древне-греческой меры веса; приставка *кило*, как уже было указано в § 2, означает *тысячу*.
[2]) Французское слово tonne означает *бочка*.
[3]) Более точные соотношения:

1 kg = 2.4419 фунта,	1 ф. = 409.51 g,
1 g = 0.2344 золотника,	1 зол. = 4.266 g,
1 t = 61 пуд 2 фунта,	1 пуд = 16.380 kg.

[4]) От греч. слов: dynamis = *сила*, metró = *мерю*.

Эта пружина, подвергаясь действию силы, „приложенной“ к динамометру, изменяет свой размер более или менее, смотря по величине силы.

Простейшим динамометром являются **пружинные весы.** Они могут иметь различное устройство. Нетрудно изготовить пружинные весы самому, как это показано в следующем §.

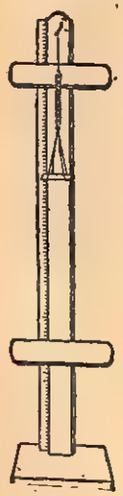

Рис. 22.

§ 20. Лабораторная работа № 4. — *Градуировать пружинные весы и произвести с помощью их взвешивание какого-нибудь тела (напр., карандаша).*

Необходимые предметы: 1) штатив с крючком наверху и с масштабом, разделенным на миллиметры; 2) пружина из латунной, железной или стальной (отожженной) проволоки, привязываемая к крючку; 3) плоская чашечка, привязываемая к нижнему концу пружины (рис. 22); 4) разновески; 5) взвешиваемое тело; 6) кусок клетчатой бумаги; 7) линейка.

Правила обращения с пружиной. Не растягивать без надобности пружину. Не класть на чашечку ничего, кроме нижеуказанных предметов.

Правила обращения с разновесками. Не касаться разновесок пальцами; брать их пинцетом. Разновески могут находиться только в двух местах: на чашечке и в своем ящике.

Способ выполнения. 1) Изготовить таблицу, разлинованную по следующему образцу:

I	II	III	IV	V	VI
Нагрузка в граммах	Показание масштаба при нагружении пружины	Показание масштаба при разгружении пружины	Среднее из чисел II и III	Удлинение пружины	Частное: $\frac{\text{удлинение}}{\text{нагрузка}}$
0 1 . . .	. . . .	. . . .	. . . .	0	— . . . .

Измерения. 2) Вначале на чашечке мы имеем нагрузку 0. Записываем это в столбце I. В столбце II записываем (в миллиметрах и десятых долях миллиметра), на каком месте масштаба находится *нижний край чашечки.*

3) Потом кладем на чашечку гирю в 1 g и точно так же записываем, на каком делении теперь находится чашечка.

4) Повторяем то же при нагрузке в 2, 3, 4, 5 и т. д. граммов, до нагрузки, указанной преподавателем.

5) Затем *убавляем* по одному грамму и точно так же записываем показания масштаба в столбце III. Если опыт произведен правильно, то числа столбцов II и III будут мало отличаться друг от друга, и по снятии всей нагрузки пружина примет прежнюю длину.

6) Акуратно убрать разновески и пинцет на их места.

Вычисления. 7) Из чисел, стоящих в одной строчке в столбцах II и III, теперь нужно взять среднее. Это среднее записывается под IV.

8) Высчитываем разности между **первым** числом столбца IV (соответствующим нагрузке 0) и **каждым из остальных** чисел того же столбца, и записываем получаемые разности в столбце V.

9) В каждой строчке, кроме первой, делим число столбца V на число столбца I и записываем частное в столбце VI. Что сказать про величину этих частных? О пропорциональности каких величин можно отсюда заключить?

Замечание 1. Назовем l удлинение пружины: назовем p силу, которая растягивает пружину. Тогда частное $\frac{l}{p}$ будет постоянною величиной. Назовем эту постоянную величину k. Получится уравнение:

$$\frac{l}{p} = k,$$

откуда

$$l = kp.$$

Здесь k есть „коефициент пропорциональности“ между переменными величинами l и p.

Замечание 2. Мы нашли важный физический закон: **удлинение пружины пропорционально силе, растягивающей ее.** Закон этот называется **законом Гука,** по имени ученого, впервые открывшего его (в XVII веке).

10) Взять среднее из всех чисел столбца VI. Принять это среднее за коефициент пропорциональности между удлинением и нагрузкой нашей пружины.

Взвешивание. 11) Кладем на чашечку тело, вес которого мы хотим узнать. Записываем, до какого деления опустилась чашечка. Отсюда, зная коефициент пропорциональности между удлинением и нагрузкой, найдем вес тела.

Построение графика. 12) Возьмем кусок клетчатой бумаги; две взаимно-перпендикулярные прямые, проходящие близ краев куска, примем за **оси.** На одной из осей будем откладывать нагрузки, при чем каждый из равных отрезков пусть означает, напр., 1 грамм, а на другой — удлинения, при чем каждый из равных отрезков пусть означает одно и то же число миллиметров. У точки пересечения осей поставим 0 (нуль); вдоль каждой из осей расставим равно-отстоящие друг от друга числа, которые будут показывать, какой нагрузке или какому удлинению отвечает отрезок от 0 до той точки, у которой стоит число (это делается для того, чтобы легче было находить графическое изображение каждой данной величины). Так как в нашем опыте каждое значение нагрузки связано с соответствующим ему значением удлинения, то установим и на графике подобную же связь: вообразим

прямоугольник, одним из углов которого служит угол между осями, и стороны которого изображают нагрузку в 1 g и соответствующее ей удлинение; отметим акуратно поставленной точкой (эту точку полезно обвести кружочком, чтобы потом не потерять ее из вида) ту вершину прямоугольника, которая лежит внутри угла, образуемого осями. Потом отметим второй точкой аналогичную вершину другого прямоугольника, стороны которого означают нагрузку в 2 g и отвечающее ей удлинение, и т. д.; так каждая строка нашей записи даст нам точку на графике (первая строка записи, очевидно, соответствует точке 0, „началу“ осей).

По какой линии приблизительно располагаются отмеченные точки? Чем объяснить некоторые неправильные уклонения их от прямой линии?

13) *С помощью линейки* провести прямую, которая проходила бы через 0 и прилегала бы возможно теснее ко всем нанесенным точкам. Эта линия служит графическим изображением закона Гука, так как расстояния каждой точки ее от обеих осей друг другу пропорциональны.

14) Как при помощи построенного графика определить (без вычисления) вес того тела, которое работающий взвешивал в № 11?

§ 21. Изменчивость силы тяжести от места к месту. — Если хорошо устроенные, чувствительные пружинные весы нагружать одним и тем же куском вещества в разных местах земного шара, то окажется следующее:

Наибольшее удлинение пружины будет получаться, если производить опыт на уровне моря. Если же делать опыт на высокой горе или в глубокой шахте, удлинение получится меньшее.

Кроме того, на разных широтах удлинение будет также меняться: оно будет увеличиваться при приближении к полюсу земного шара и уменьшаться при приближении к экватору.

Разница в получаемом результате может достигать $^1/_2$% измеряемой величины и даже несколько более.

Так как по закону Гука удлинение пружины пропорционально растягивающей силе, то из сказанного следует, что **сила тяжести в разных точках земного шара действует не одинаково сильно.**

§ 22. Условие, при котором пружинные весы являются точным динамометром. — Из сказанного в предыдущем § следует:

„Если мы хотим, чтобы пружинные весы точно показывали в килограммах или граммах величину действующей на них силы, *мы должны градуировать их в Париже:* ибо именно здесь сила веса „прототипа килограмма“ равняется 1 kg, и т. п.

В других местах тот же прототип килограмма будет действовать на пружину весов сильнее или слабее, и вообще градуировка динамометра получится там неверная, — с ошибкой до $^1/_2$%.

§ 23. Масса. — Но хотя пружинные весы, градуированные *в произвольном месте* земного шара, и не являются точным динамометром, — все же они — вместо силы — точно указывают нечто другое.

Положим, мы наблюдаем, что некоторое тело, положенное на чашку пружинных весов, производит как раз такое удлинение пружины, какое производила при градуировании гирька в 10 граммов. Понятно, что если бы было возможно нам отправиться не только в другое место земли, но даже на луну (где сила тяжести в 6 раз слабее, чем на земле), то и там данное тело и 10-граммовая гирька производили бы одинаковое удлинение пружины (на луне — в 6 раз меньшее, чем на земле).

Ясно, что у данного тела есть какое-то свойство, *общее* с данной гирькой. Это свойство условились называть **массой**, при чем принимают массу за **меру количества вещества в теле.** Итак:

Два тела содержат одинаковое количество вещества (имеют равную массу), если они своей тяжестью производят одинаковое удлинение данной пружины.

Взвешивая тело на пружинных весах, градуированных тут же на месте, мы в сущности определяем *массу* тела; результат взвешивания, обычно называемый „весом“, есть в сущности не что иное, как масса.

Когда речь идет о пружинных весах, употребляемых в обычной практике, тогда излишне делать оговорку относительно места, где они градуированы: все равно, они настолько грубы, что точность взвешивания далеко не достигает $^1/_2$%. О таких весах можно сказать, что они измеряют и силы, и массы (правда, с малой точностью).

§ 24. Единицы массы. — За единицу массы принимают массу того самого куска вещества, который называется „прототипом килограмма“ (§ 18). Эта масса называется — **килограмм** (сокращенно — **кило**).

Таким образом слово „килограмм“ имеет два различных значения: во-первых, оно означает силу, с которой давит на подставку (в Париже) известный платиновый цилиндр; во-вторых, оно означает массу, равную массе того же цилиндра. Когда мы боимся, как бы при употреблении слова „килограмм“ не произошло смешения или недоразумения, мы можем прибавить пояснительное слово и говорить: **килограмм-сила или килограмм-масса.**

Сокращенное обозначение килограмма-массы есть kg. А килограмм-силу, для отличия, иногда означают так: kg*.

Кратные и доли килограмма-массы называются и сокращенно обозначаются так же, как и в случае килограмма-силы (стр. 25). Когда же значки g, dg, cg, mg, t означают меры силы, полезно при них ставить звездочку (*).

Практическим осуществлением мер массы являются гири или разновески. На каждой гире или разновеске обыкновенно значится присущая ей масса.

§ 25. Рычажные весы. — Для измерения масс пользуются главным образом **рычажными весами.** Это — один из самых важных физических приборов. На рис. 23 показано устройство так называемого „рычага“ или „коромысла“ весов: к нему приделан „указатель“ 1 и три стальные „призмы“ или ножа A, C, B; острые ребра всех трех призм находятся в одной плоскости.

Посредством призмы C коромысло опирается на „подушку“ из твердого материала, находящуюся наверху колонки весов; призмы A и B служат для навешивания чашек. К колонке весов приделана скáла S и отвес.

У верных весов левое „плечо“ коромысла в точности равняется правому, и обе чашки имеют одинаковый вес. В таком случае, при вертикальном положении колонки, указатель 1 устанавливается посредине скалы S („на нуле“).

Желая узнать массу какого-нибудь тела, мы кладем это тело на одну из чашек, а на другую в определенном порядке накладываем разновески до тех пор, пока указатель не придет на нуль скáлы. Тогда сила тяжести тела равна силе тяжести разновеса, а масса тела равна массе разновеса.

Результаты взвешивания обычно выражают словами:

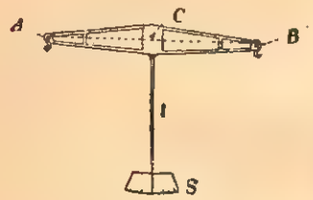

Рис. 23.

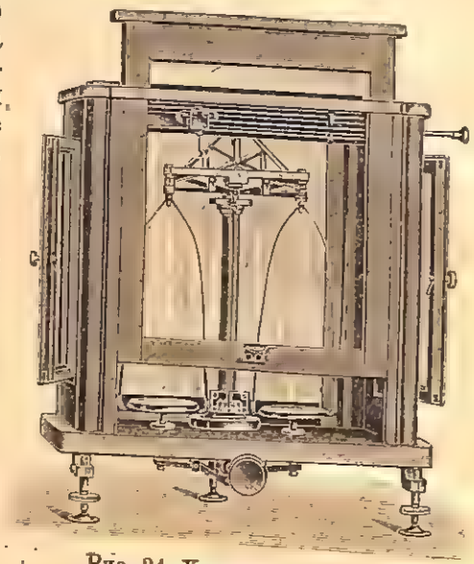

Рис. 24. Химические весы.

„тело *весит* столько-то граммов“ или „*вес* тела составляет столько-то граммов“. Но понимать эти слова нужно так: „*масса* тела равна стольким-то граммам“.

На рис. 24 изображены „химические“ или „аналитические“ весы, употребляемые для производства химических анализов.

Бывают весы, дающие точность до миллионной доли процента (это соответствует ошибке в 0,01 mg при взвешивании одного килограмма).

§ 26. Способ тарирования. — Можно верно взвесить тело и на неверных весах. Для этого кладут на одну чашку весов взвешиваемое тело, а на другую накладывают „тару“ (дробь, кусочки бумаги и т. п.), пока указатель не придет на середину скáлы. Затем снимают тело и *заменяют* его таким количеством разновесок, чтобы указатель опять пришелся посредине скáлы. Масса тела равна массе разновесок, независимо от верности или неверности весов. Такой способ называется способом „замены“ или „тарирования“.

Замечание 1. Определение массы тела при помощи пружинных весов в сущности также основано на „замене“ действительной или воображаемой гирей — взвешиваемым телом.

Замечание 2. С другой стороны, можно и на верных весах получить неверный результат. Дело в том, что о равенстве веса тела и гирь можно судить по положению указателя только в случае, если весы — в покое, или если указатель одинаково отклоняется в ту и в другую сторону от положения равновесия. Но если бросать товар на чашку и не выждать полного колебания, то не трудно произвести ложное впечатление, что товар даже перевешивает гири. Известно, что опытные розничные торговцы нашли, что для них выгоднее пользоваться весами чувствительными, т.-е. такими, у которых малая перегрузка одной чашки сильно изменяет положение указателя.

§ 27. Весы Роберваля. — Нередко употребляются „весы Роберваля“, которые для обиходного употребления более удобны, чем весы с висячими чашками. Их вид и внутреннее устройство показаны на рис. 25. Здесь вместо коромысла — параллелограмм ABA'B', имеющий две точки опоры C и C'; в вершинах параллелограмма находятся шарниры. Чашки расположены вверху. Весы Роберваля менее чувствительны, чем обыкновенные.

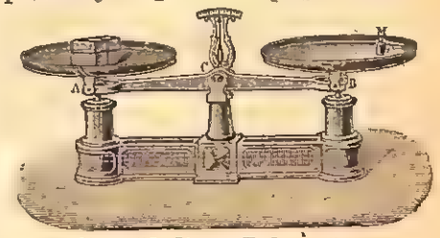

Рис. 25. Весы Роберваля.

§ 28. Правила обращения с весами. — Учащийся приступает теперь к производству „взвешиваний“. Предварительно он должен твердо усвоить следующие правила:

1) Не трогать весов (а также разновесок) руками. Не класть на чашки весов ничего грязного; накладываемую тару помещать в каком-нибудь сосуде. Особенно остерегаться, чтобы на весы не попадала никакая жидкость.

2) Как взвешиваемое тело, так и разновески ставить на чашки весов мягко, без толчка [1]).

3) Разновески не должны лежать нигде, кроме как на чашках весов или в предназначенных для них гнездах ящика.

§ 29. Лабораторная работа № 5. — *Определить π взвешиванием.*

Необходимые предметы: 1) весы с разновесками, 2) круг и квадрат, вырезанные из (одинакового) картона или из толстой бумаги; сторона квадрата должна равняться диаметру круга.

Способ выполнения. 1) Если при весах имеется отвес, то установить их по отвесу.

2) Зарисовать, на каком делении скáлы находится указатель при равновесии ненагруженных весов. Это положение указателя считать „нулевым“.

3) Положить квадрат на левую чашку весов. На правую чашку класть разновески. Начинать с разновески более тяжелой, чем взвешиваемое тело; переходя постепенно к меньшим разновескам, найти первую разновеску, которая будет легче, чем тело. Сделанные пробы записывать по схеме, указанной ниже, выражая их в граммах и десятичных долях грамма.

[1]) Если у весов есть *аретир* (приспособление, посредством которого можно сделать коромысло и чашки неподвижными), то необходимо „аретировать“ весы при всяком накладывании или снятии груза и разновесок.

4) К разновеске, лежащей на чашке, прикладывать другие в последовательном порядке, опять-таки переходя от бо́льших к меньшим. Когда разновески перетянут тело, убрать назад последнюю положенную и опять **последовательно** прикладывать разновески меньшие, чем только что снятая, и т. д. Все пробы записывать.

Пример. Пусть вес тела будет 17.38 g. Ход взвешивания записан в следующей схеме (предполагая, что набор разновесок построен так: 1 + 1 + 1 + 2 + + 5 + 10 + 10 + 20 + 50 + 100 + 100 + 200).

	Много	Мало	
Кладем наудачу 10.		10	Снимаем 10 и кладем следующую более тяжелую гирьку, т.-е. 20.
	20		Снимаем 20 и кладем 10 + 5.
		15	Прибавляем 2.
		17	Прибавляем 1.
	18		Снимаем 1 и кладем 0.5.
	17.5		Снимаем 0.5 и кладем 0.2.
		17.2	Прибавляем 0.1.
		17.3	Прибавляем 0.1.
	17.4		Снимаем 0.1 и кладем 0.05.
		17.35	Прибавляем 0.02.
		17.37	Прибавляем 0.01: на чашке лежит 17.38; получается равновесие [1].
	17.38		

Такой способ приводит к цели гораздо скорее, чем какой бы то ни было другой.

5) Убрав разновески на их места, точно так же свешать круг.

6) Акуратно убрать разновески и пинцет на их места.

7) Площадь круга $\frac{\pi d^2}{4}$ (где d—диаметр) относится к площади квадрата d^2, как вес круга к весу квадрата. Отсюда найти $\frac{\pi}{4}$, а затем π, соблюдая правило приближенных вычислений (стр. 15).

8) Сколько процентов составляет ошибка? Сравнить с результатом выполненной раньше работы № 1.

Замечание 1. Ожидать при взвешивании, пока весы успокоятся, нередко означало бы бесполезную трату времени. Можно успокоить качания весов, дотрогиваясь до чашек снизу кусками фильтровальной бумаги. Можно также руководиться следующим правилом: **если весы качаются, так что указатель описывает дугу, то по успокоении весов указатель окажется на середине этой дуги.**

Замечание 2. Когда хотят достигнуть более верных результатов взвешивания, то повторяют взвешивание два раза, при чем второй раз кладут тело на правую чашку весов, а разновески — на **левую**. Из двух полученных результатов берется среднее. Такой способ называется „двойным взвешиванием". Этим способом освобождаются от влияния небольшого неравенства плеч коромысла.

[1]) Производя взвешивания, следует записывать делаемые пробы просто в виде цифровой таблицы „Много—Мало", без словесных пояснений, которые даны здесь лишь для того, чтобы сделать ход опыта более понятным.

§ 30. Веревочные весы. — Всякий легко может сделать сам веревочные весы, изображенные на рис. 26. К горизонтальной перекладине прикреплена веревка или нить, к которой в двух точках привешены чашки. Посредине веревки сделан узелок, который при равенстве нагрузок обеих чашек приходится против вертикальной черты, нарисованной на неподвижном куске картона. На одну чашку весов кладется взвешиваемое тело, на другую—гири. При взвешивании малых грузов можно вместо гирь пользоваться советской монетой, зная, что 1 копейка в медной монете весит 3.25 g, в мелкой серебряной — 0.179 g, а серебряный полтинник—10g [1])

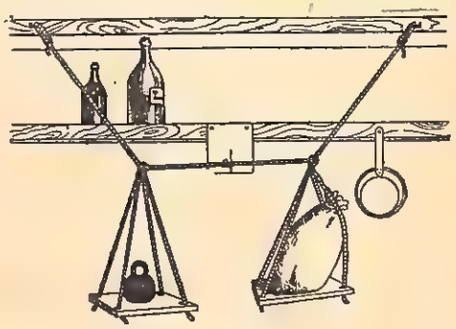

Рис. 6.

ГЛАВА III.

Измерение плотностей.

§ 31. Плотность (удельный вес). — Если из различных материалов (свинец, железо, дерево...) сделать кубики объемом в 1 cm^3, то масса этих кубиков будет резко различаться: свинцовый будет весить около 11 g, железный — около 8 g, деревянный, смотря по сорту дерева,— от $^1/_2$ до 1 g.

Вещество, которое в данном объеме содержит бо́льшую массу, называется более **плотным**. Таким образом свинец плотнее железа, а железо плотнее дерева.

Рассматривают **плотность** вещества, как особого рода величину, измеряемую числом граммов массы в одном кубическом сантиметре. Для определения плотности какого-нибудь **однородного** тела достаточно **массу** этого тела, выраженную в граммах, разделить на **объем** его, выраженный в кубических сантиметрах.

Замечание. Подобное деление друг на друга именованных чисел с разными наименованиями широко применяется при физических вычислениях. Правило такого деления аналогично правилу перемножения именованных чисел (§ 12): нужно числовые значения разделить обычным порядком, а из наименований делимого и делителя составить наименование частного так, как если бы эти наименования были алгебраическими количествами.

Напр., если вес куска латуни = 84 g, а объем его — 10 cm^3, то плотность будет 84 g : 10 cm^3 = 8.4 $\frac{g}{cm^3}$. Это читается так: 84 грамма в кубическом сантиметре.

[1]) Что касается новой бронзовой монеты, то здесь число граммов в кружке равно числу копеек.

Иначе плотность называют **удельным весом**.

Знание плотности веществ приносит большую пользу в практике. Так, чтобы при составлении проектов сооружений вперед вычислять вес разных тел по их объему, необходимо знать плотность употребляемых материалов (вес же сооружения надо знать для того, чтобы правильно определить размеры фундамента).

Определив опытом плотность какого-нибудь раствора (напр., спирта в воде, серной кислоты в воде), можно из особых таблиц узнать, какова „крепость“ этого раствора.

Иногда определяют плотность данного материала для того, чтобы судить о степени его чистоты, напр., чтобы отличить настоящую звонкую монету от поддельной.

§ 32. Алгебраические формулы.— Если массу тела в граммах назовем m, объем его в куб. сантиметрах назовем v, то для плотности d будем иметь формулу:

$$d = \frac{m}{v}.$$

Из этой формулы следует $m = vd$, т.-е. масса тела равна его объему, помноженному на плотность. Напр., если объем кирпича 2000 cm³, плотность его $2\ \frac{g}{cm^3}$, то масса его будет $2000\ cm^3 \times 2\ \frac{g}{cm^3} = 4000\ g = 4\ kg$. Далее следует, что $v = \frac{m}{d}$, т.-е. объем тела можно узнать, разделяя его массу на плотность. Напр., если требуется найти, как велик будет объем куска железа весом в 16 kg, то стоит только разделить 16000 g на плотность железа $7.8\ \frac{g}{cm^3}$; получится $16000\ g : 7.8\ \frac{g}{cm^3} = 2051\ cm^3$, т.-е. немного более 2 куб. десиметров.

Замечание. Сказанное выше относилось к телам **однородным**. Если массу какого-нибудь **неоднородного** тела, выраженную в граммах, разделим на объем его в куб. сантиметрах, то частное называется **средней плотностью тела**. Так, средняя плотность человеческого тела—около $1\ \frac{g}{cm^3}$.

§ 33. Лабораторная работа № 6.— *Определить плотность твердого тела правильной формы.*

Необходимые предметы: 1) весы с разновесками; 2) тело правильной геометрической формы (напр., деревянный цилиндр, употреблявшийся для работы № 1, или стеклянная призма, или стальной „моторный“ шар, или несколько стальных шариков равного, не очень мелкого размера); 3) в случае деревянного цилиндра или стального шара,—раздвижной калибр; в случае стальных шариков — винтовой калибр; при неимении калибров можно их заменить масштабом с миллиметровыми делениями.

Способ выполнения. 1) Взвесить данное тело (или тела — если их несколько), соблюдая указания §§ 28 и 29.

2) Измерив в сантиметрах линейные размеры данного тела [1]), вычислить его объем по соответствующей геометрической формуле (напр., в случае шара объем равен $\frac{\pi d^3}{6}$, где d — диаметр) [2]). При вычислениях придерживаться правил стр. 15.

3) Высчитать плотность.

4) Оценить возможную процентную ошибку в весе, в объеме и в плотности.

5) Если имеется мензурка, и если испытуемое тело входит в нее, то проверить найденное значение объема посредством мензурки.

§ 34. Плотность воды. Литр.— Имея весы и измерительный сосуд, мы могли бы без труда определить плотность воды. Результат получился бы необыкновенно простой: $1\ \frac{g}{cm^3}$.

Такая простота результата отнюдь не случайна. **Употребляемые в физике меры массы и протяженности нарочно поставлены в такое соотношение между собой, что плотность воды получается равною единице.** У французских ученых, устанавливавших в конце XVIII века новую единицу массы — килограмм, было намерение сделать ее как раз равною массе одного кубического десиметра чистой воды при температуре ее наибольшей плотности (4° Цельсия). Намерение это, разумеется, не осуществилось с полной точностью; но все же с огромной степенью приближения можно считать, что:

1 dm³ чистой воды при 4° Цельсия весит 1 kg,
1 cm³ чистой воды при 4° Цельсия весит 1 g,
1 m³ чистой воды при 4° Цельсия весит 1 t и т. д. [3]).

Истинный объем одного килограмма чистой воды при 4° Цельсия называется **литр** (*l*); из предыдущего видно, что литр очень мало отличается от кубического десиметра [4]). Поэтому

1 литр = 1 куб. десиметру = 1000 куб. сантиметров.

---

[1]) Рекомендуется повторять каждое линейное измерение несколько раз и потом брать среднее.

[2]) При отсутствии калибров, линейные размеры цилиндра или призмы определяются как в упражнении № 1. Диаметр шара определяется так: помещают шар между двумя брусками, как показано на рис. 27, и измеряют расстояние между брусками. В случае более мелких шариков употребляется такой способ: между двумя масштабами, лежащими на столе, зажимают линейный ряд шариков, соприкасающихся друг с другом; к первому и последнему шарику прикладывают брусочки; затем измеряют расстояние между брусочками и делят его на число шариков в ряде.

Рис. 27.

[3]) В пределах температуры от 0° до 20° по Цельсию плотность воды отличается от $1\ \frac{g}{cm^3}$ весьма мало — не более, чем на 0.2 %.

[4]) Точнейшие измерения показали, что объем 1 kg воды при 4° и 760 mm давления равен 1.000 027 dm³.

Употребляются кратные литра (килолитр = 1000 *l*, эктолитр = 100 *l*, декалитр = 10 *l*) и подразделения его (десилитр = = 0.1 *l*, сантилитр = 0.01 *l*, миллилитр = 0.001 *l*).

§ 35. Определение плотности в различных видах. — Мы определили плотность, как такое частное:

$$\text{плотность тела} = \frac{\text{масса тела в граммах}}{\text{объем тела в куб. сантиметрах}}.$$

Но объем тела = объему воды, вытесняемой телом (§ 11); а объем воды в куб. сантиметрах выражается тем же числом, как масса ее в граммах, следовательно, если мы составим частное:

$$\frac{\text{масса тела}}{\text{масса воды, вытесняемой телом}}$$

и придадим ему наименование $\frac{g}{cm^3}$, то это опять будет не что иное, как выражение плотности.

А так как масса тела пропорциональна силе тяжести его, то можно еще сказать, что **числовое значение плотности показывает, во сколько раз данное вещество тяжелее воды.**

Таблица плотностей некоторых веществ

(в граммах на куб. сантиметр) [1].

Твердые вещества.

Платина	21.4
Золото	19.3
Свинец	11.4
Серебро	10.5
Медь	8.9
Латунь (сплав меди с цинком)	около 8.4
Железо сварочное, сталь	7.8
„ литое	7.25
Олово	7.3
Цинк	7.2
Чугун	около 7
Алмаз	3.52
Кварц	2.65
Гранит	от 2.5 до 3
Известняк	около 2.6
Алюминий	2.6
Стекло обыкновенное	2.6
Фарфор	около 2.3
Земля свежая, глинистая	2
Земля сухая	от 1.6 до 1.9
Кирпич	от 1.4 до 2.2
Натрий	0.98
Лед	0.92
Парафин	0.89
Дубовое дерево	0.8
Сосновое дерево (сухое)	0.5
Пробка	0.24

Жидкости.

Ртуть	13.6
Серная кислота	1.85
Вода	1
Масла́	около 0.92
Жидкий кислород	0.9
Керосин	около 0.8
Спирт (алкоголь) этиловый	0.8
Нефть	0.76
Эфир (этиловый)	0.74
Жидкий азот	0.4
Жидкий водород	0.26

§ 36. Пикнометр. — Для определения плотности жидких и твердых веществ употребляется прибор, называемый *пикнометром* [1]). Простейший пикнометр представляет собою маленькую колбочку с довольно длинной шейкой; на шейке процарапана поперечная черта, служащая меткой.

[1]) Легко́ сообразить, что будем ли мы выражать плотность данного вещества в $\frac{g}{cm^3}$, или в $\frac{kg}{dm^3}$, или в $\frac{t}{m^3}$ (последняя мера особенно удобна для технических целей) — числовое значение плотности будет то же самое.

Лабораторная работа № 7. — *Определить плотность жидкости.*

Необходимые предметы: 1) весы с разновесками; 2) пикнометр; 3) испытуемая жидкость (напр., раствор какой-нибудь соли в воде); 4) вода комнатной температуры; 5) фильтровальная бумага.

Способ выполнения. 1) Убедившись в том, что пикнометр сух, найти вес его (p); *при этом и далее соблюдать все правила взвешивания* (§ 28, 29).

2) Наполнить пикнометр жидкостью до метки [2]); излишек жидкости отсасывать тонкой палочкой, свернутой из фильтровальной бумаги. Снаружи пикнометр должен быть совершенно сух.

При обращении с пикнометром, по возможности, не нагревать его и жидкость руками; для этого брать пикнометр только за шейку двумя пальцами.

3) Найти вес p_1 пикнометра с жидкостью.

4) Вылить жидкость из пикнометра и прополоскать его водою.

5) Наполнить пикнометр водою до метки, соблюдая указания пункта 2.

6) Найти вес p_2 пикнометра с водою.

7) Высчитать вес жидкости в объеме пикнометра $(p_1 - p)$.

8) Высчитать вес воды в том же объеме $(p_2 - p)$.

9) Высчитать плотность жидкости $\left(\frac{p_1 - p}{p_2 - p}\right)$.

Вопрос. Сколько куб. сантиметров вмещает наш пикнометр до метки?

§ 37. Лабораторная работа № 8. — *Определить плотность твердого вещества.*

Необходимые предметы: 1) весы с разновесками; 2) пикнометр; 3) испытуемое вещество в виде мелких кусочков (напр. фарфоровые шарики, железные или стальные гвоздики); 4) вода комнатной температуры; 5) фильтровальная бумага; 6) тонкая спица или деревянная палочка.

Способ выполнения. 1) Найти вес q данного количества испытуемого вещества.

NB! При всех взвешиваниях соблюдать правила § 28 и 29.

2) Наполнить пикнометр водою до метки и поставить его на ту же чашку весов, где находится испытуемое вещество.

3) Найти вес испытуемого вещества вместе с пикнометром, наполненным водою (q_1).

4) Сняв пикнометр с весов, всыпать в него испытуемое вещество (важно не утерять ни одного кусочка), следя, чтобы в пик-

[1]) От греч. слов: pyknos = *плотный*, metró = *мерю*.

[2]) Поверхность воды или водного раствора в стеклянной трубке имеет вогнутую форму. При наполнении пикнометра следует стремиться к тому, чтобы метка была в одной горизонтальной плоскости с самой нижней точкой вогнутой поверхности жидкости.

нометре не оставалось пузырьков воздуха (их можно выгонять палочкой или спицей); довести уровень воды до метки.

5) Найти вес q_2 пикнометра с водою и веществом внутри его.

6) Высчитать вес воды, вытесненной веществом $(q_1 - q_2)$.

7) Высчитать плотность вещества $\left(\frac{q}{q_1 - q_2}\right)$.

Вопрос. Как велик объем данного количества испытуемого вещества?

§ 38. О плотности газов.— У тел газообразных, как, напр., у воздуха, объем может сильно меняться в зависимости от нагревания, и еще больше — в зависимости от давления, которому подвергается газообразное тело; поэтому и плотность газа зависит от условий, в которых он находится. С законами, которые определяют эту зависимость, мы познакомимся позднее.

ГЛАВА IV.

Движение и его законы.

§ 39. Движение.— Если предмет меняет свое расположение в пространстве по отношению к какому-нибудь другому предмету, то говорят, что он *движется*. Как и всякое явление природы, движение совершается „во времени"; чтобы уметь мерить движение и выражать его законы, необходимо условиться относительно измерения времени.

§ 40. Меры времени. — **Средние солнечные сутки** [1]) (j) делятся на 24 **часа** (h). Час делится на 60 **минут** (mn) или на 3600 **секунд** (sec или s).

Секунда в физике принимается за основную единицу времени. Ее можно на основании сказанного определить, как $\frac{1}{86\,400}$ часть средних солнечных суток.

§ 41. Измерение времени.— Для измерения промежутков времени пользуются, кроме обыкновенных часов, *хронометрами* [2]) (это — точные часы, идущие действием пружины) и *секундомерами* (это — инструмент вроде карманных часов; около центра циферблата, разделенного на секунды и доли секунды, ходит стрелка, обегающая весь циферблат в течение минуты; в начале измеряемого промежутка времени ее пускают в ход, а в конце того же промежутка — останавливают; имеется другая, маленькая, стрелка — минутная).

---

[1]) Средние солнечные сутки (называемые в общежитии просто „сутками") на 4 минуты длиннее **звездных суток**, которые представляют собой время одного обращения земли около оси.

[2]) От греч. слов chrónos = *время*, metró = *мерю*.

Полезным прибором для отсчитывания равных небольших промежутков времени служит *метроном* [1]) (рис. 28). Существенную часть его составляет маятник, стальной стерженек которого значительно выступает над осью вращения. По стерженьку можно передвигать грузик, от положения которого зависит время качания маятника. Колебания маятника и сопровождающие их удары поддерживаются пружинным часовым механизмом. Числа на скáле, находящейся позади стерженька, указывают, сколько ударов в минуту делает прибор, когда грузик стоит на соответствующем месте скáлы (деления же на самом стерженьке служат для условного определения быстроты музыкальных исполнений).

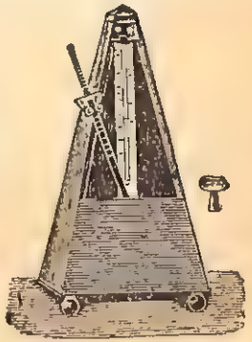

Рис. 28. Метроном.

§ 42. Движение равномерное и переменное.— **Если движущийся предмет в каждый из равных промежутков времени проходит равные расстояния**, то движение называется **равномерным**. Пример равномерного движения: движение какой-нибудь точки земной поверхности вследствие вращения земли вокруг оси. Многие движения могут быть считаемы *приблизительно* за равномерные: напр., движение автомобиля по ровному шоссе.

Всякое другое движение называется **переменным** или **неравномерным**. Пример: движение качающегося маятника.

§ 43. Скорость равномерного движения.— **Скоростью равномерного движения называется частное от деления пройденного расстояния на протекшее время.** Так, напр., если автомобиль, двигаясь равномерно, прошел 1500 cm в 3 sec, то скорость его будет $\frac{1500\ \text{cm}}{3\ \text{sec}}$ или 500 $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$. Это читается: **500 сантиметров в секунду.** Таким образом число, выражающее скорость, показывает нам, сколько единиц длины проходится движущимся телом в единицу времени.

Из определения скорости видно, что скорость есть физическая величина особого рода, имеющая особое наименование. В предыдущем примере это наименование произносится словами „сантиметров в секунду", а пишется условным знаком $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$. Роль единицы скорости в том же примере играет 1 $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$; это — **скорость такого равномерного движения, при котором в 1 секунду проходится 1 сантиметр.** Понятно, что при других единицах длины и времени будет другая единица скорости. Так, если бы в нашем примере мы взяли за единицу длины метр, а за единицу времени — минуту, то скорость автомобиля выразилась бы частным 15 m : $\frac{1}{20}$ mn

---

[1]) От греч. слов métron = *мера*, nómos = *правило, музыка*.

или 300 $\frac{m}{mn}$: здесь единицей скорости является 1 $\frac{m}{mn}$. Наконец, если за единицу длины примем километр, а за единицу времени — час, то та же скорость выразится частным $\frac{15}{1000}$ km : $\frac{1}{1200}$ h или 18 $\frac{km}{h}$. Здесь единица скорости — 1 $\frac{km}{h}$.

§ 44. Уравнение равномерного движения. — Если расстояние, пройденное равномерно двигавшимся предметом, обозначим буквою s; время, в течение которого пройдено это расстояние, — буквою t; наконец, скорость — буквою v, то определение скорости перепишется в виде такой формулы:

$$v = \frac{s}{t},$$

из которой вытекают две другие: $s = vt$ и $t = \frac{s}{v}$. Каждую из этих формул называют **уравнением равномерного движения.** Из трех величин, входящих в уравнение равномерного движения, скорость v есть величина постоянная для данного движения; в уравнении $s = vt$ она служит „коефициентом пропорциональности" между переменными величинами t и s. Мы видим, что **в равномерном движении пройденное расстояние прямо-пропорционально протекшему времени.**

Решим **задачу**: сколько времени проведет в движении аэроплан, совершающий кругосветное путешествие по кратчайшему пути, если скорость его будет 200 $\frac{km}{h}$?

Вопрос решается по формуле $t = \frac{s}{v}$. Подставляя числовые значения (вместо s — длину окружности земли или 40 000 km, вместо v — 200 $\frac{km}{h}$), получим $t = 40\,000$ km : 200 $\frac{km}{h}$ = 200 h = $8\,^1/_3$ j.

Решим другую **задачу**: маховое колесо паровой машины делает 30 оборотов в минуту. Радиус колеса = 1.5 m. Найти скорость точки, лежащей на окружности колеса.

Решение. Окружность колеса — $2\pi \times 1.5$ метров; точка на окружности проходит в минуту $2\pi \times 1.5 \times 30$ метров, в секунду $\pi \times 1.5 = 4.71$ m.

§ 45. Средняя скорость переменного движения. — Представим себе какое-нибудь тело, движущееся неравномерно: напр., поезд, идущий от одной станции до другой. Назовем расстояние между станциями s; время, протекшее от момента выхода поезда с первой станции до момента прихода его на вторую, назовем t. Если разделим s на t, то частное $\frac{s}{t}$ здесь не покажет нам скорость движения нашего поезда, ибо он двигался неравномерно, — быстрота его движения в разное время была различна; тем не

менее это частное $\frac{s}{t}$ имеет некоторый вполне определенный смысл. А именно, оно означает скорость некоторого воображаемого тела, которое выходит с начальной станции в один момент с поездом, а затем, **двигаясь равномерно**, приходит на конечную станцию также в один момент с ним. Скорость такого воображаемого тела называется в данном случае **средней скоростью** поезда.

Вообще, средней скоростью любого тела за промежуток времени t называется частное, которое мы получим, разделив на t то расстояние, которое было за это время телом пройдено.

Задача. Пассажирский поезд Северных железных дорог выходит из Москвы в 19 ч. 50 мин., а приходит в Вологду (расстояние от Москвы 502 km) на следующий день в 10 ч. 10 мин. Найти среднюю скорость поезда на участке Москва—Вологда.

Решение. Здесь $t = 14\,^1/_3$ h; $v = \frac{s}{t} = 502$ km : $14\,^1/_3$ h = 35 $\frac{km}{h}$.

§ 46. Графическое изображение времени и расстояния в равномерном движении. — Положим, что некоторое тело, двигаясь равномерно, проходит в каждую секунду 3 сантиметра. В таком случае через 1 sec после начала равномерного движения оно будет на расстоянии 3 cm от своей исходной точки; через 2 sec — на расстоянии 6 cm; через 3 sec — на расстоянии 9 cm и т. д. Изобразим это явление **графически.** Для этого возьмем две взаимно-перпендикулярные прямые или **оси**, пересекающиеся в точке O (рис. 29); ту и другую разделим на равные отрезки, и точки деления занумеруем целыми числами по порядку, при чем точка O на обеих осях пусть соответствует **нулю.**

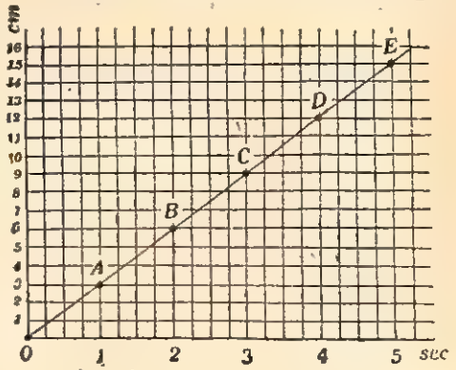

Рис. 29.

Затем сделаем такое условие: пусть точки горизонтальной оси соответствуют различным моментам времени [1]), начиная от начала равномерного движения рассматриваемого тела; точки же вертикальной оси пусть изображают различные места, через которые проходило движущееся тело. Горизонтальную ось будем называть осью времен, а вертикальную — осью расстояний.

Когда прошла 1 секунда от начала равномерного движения, тело было на расстоянии 3 cm от исходной точки; так как эти

---

[1]) Подобно этому, напр., в часах различные точки на окружности циферблата соответствуют различным моментам времени. Слово *момент* (латинское moméntum) означает здесь (как и в предыдущем §) *мгновение.*

два именованные числа связаны в нашем явлении, то свяжем их и на нашем графике: для этого поставим на нем точку, которая была бы от вертикальной оси на таком же расстоянии, как точка, изображающая 1 sec, а от горизонтальной — на таком же, как точка, изображающая 3 cm. Назовем эту точку A. Точно так же поставим точки B, C, ..., которыми отмечается связь протекшего времени с пройденным расстоянием при дальнейшем движении тела. Наконец, к числу этих точек надо отнести и точку O: она соответствует самому началу равномерного движения тела, когда и протекшее время и пройденное расстояние выражаются нулем.

Мы замечаем, что все точки O, A, B, C, ... **лежат на одной прямой.** Проведем эту прямую; легко сообразить, что не только отмеченные точки ее, но и каждая ее точка соответствует тому или другому моменту рассматриваемого движения. Если график построен на клетчатой бумаге, то с помощью его чрезвычайно легко определить, какое расстояние было пройдено движущимся телом во всякое время. Так, напр., из рис. 29 сразу видно, что через 3.5 sec после начала движения тело прошло 10.5 cm.

Мы видим, что **при равномерном движении зависимость пройденного расстояния от времени графически изображается прямою линией.**

Замечание. Как на примере закона Гука (§ 20), так и здесь мы убеждаемся в справедливости такого правила: **если две переменные величины y и x изображаются прямо-пропорционально друг другу, то зависимость между ними выражается: графически — прямою линией, проходящей через начало осей, а алгебраически — формулой $y = kx$,** где k — некоторая постоянная величина, „коефициент пропорциональности"; числовое значение этого коефициента пропорциональности зависит от того, в каких единицах выражаются величины x и y.

§ 47. Применение графического изображения движений. — График сразу показывает, в каком месте своего пути находится движущееся тело в любой момент. Если по одному пути движутся несколько тел, то с помощью графика очень легко видеть, на каком расстоянии они находятся друг от друга, и не сталкиваются ли они. Поэтому графики широко употребляются для изображения движений железнодорожных поездов. При этом движение поездов между станциями считается, для простоты, за равномерное.

Задача. На рис. 30 дан график действительного движения на одной железнодорожной линии. Разобраться в нем и ответить на следующие вопросы:

1) Как отличить поезда, идущие от Москвы, и поезда, идущие в Москву?

2) Который из следующих двух поездов движется быстрее: выходящий из Москвы в 10 ч. 30 мин. утра или выходящий из Москвы в 11 ч. 10 мин. утра?

3) Указать поезда, идущие без остановок.

4) Сколько поездов встретит поезд, приходящий в Москву в 6 ч. 15 мин. дня, и где произойдут встречи?

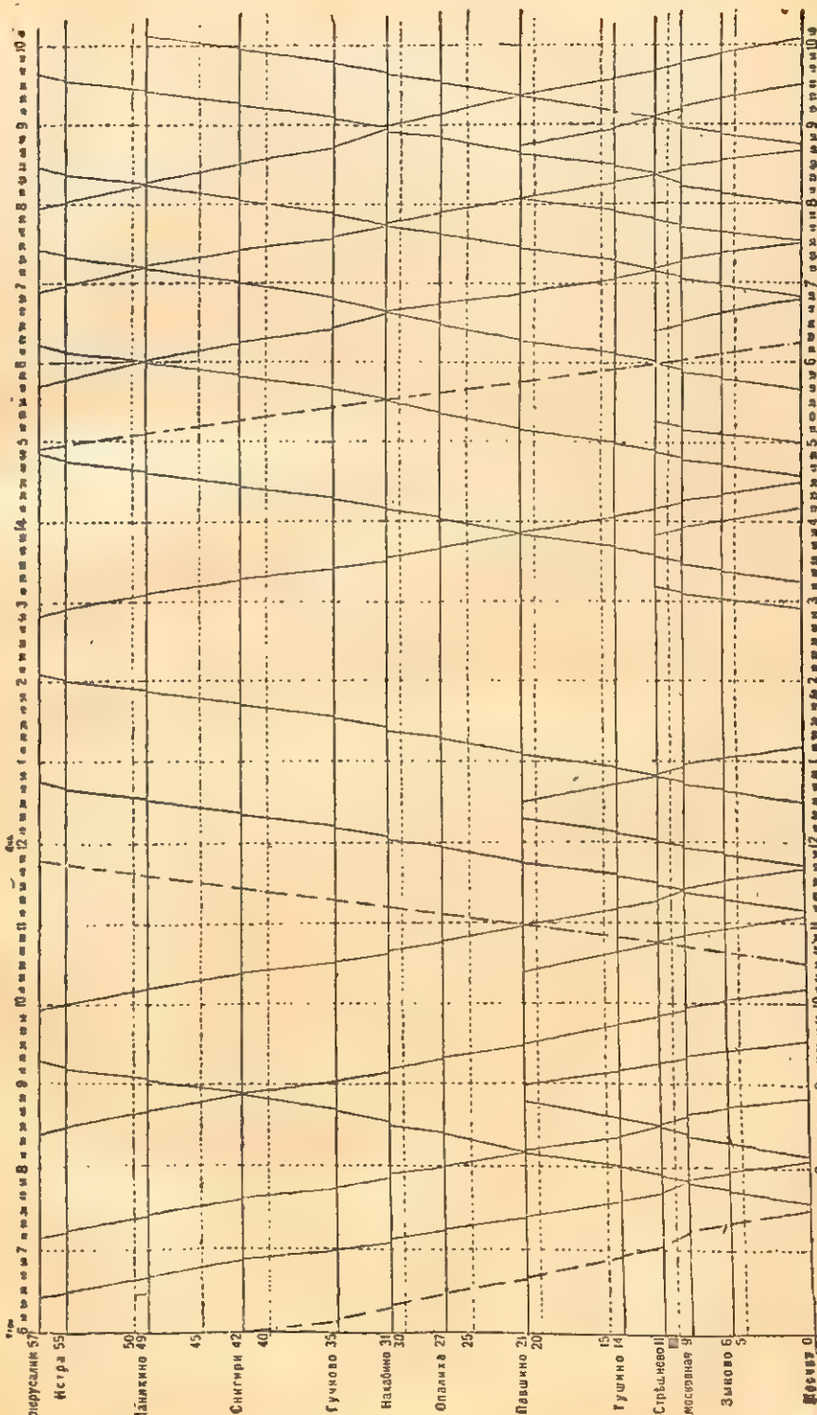

Рис. 30. График движения поездов Московско-Виндаво-Рыбинской жел. дор. между станциями Москв. Новоиерусалимская. Лето 1923 года.

5) Два лица, из которых одно живет в Москве, а другое на станции Снигири, желают встретиться друг с другом на станции Нахабино. Когда они должны выехать, чтобы прибыть на место встречи одновременно? Когда произойдет встреча?

§ 48. Скорость есть вектор. — Если мы, желая дать понятие о скорости движения тела, укажем лишь *величину* скорости, то такое понятие будет не полным. Дело в том, что со скоростью движения тела связано всегда некоторое направление, а именно — то направление, по которому движется тело в данный момент.

Если движение происходит по прямой линии, то направление этой линии и считается за направление скорости; если же тело движется по кривой, то в каждый момент скорость направлена по касательной, проведенной к кривой в той точке, в которой находится тело в данный момент.

Итак, **скорость характеризуется величиной и направлением**; короче сказать: **скорость есть величина направленная.**

Величины направленные называются **векторами** [1]). Есть величины другого рода, которым признак направления совершенно чужд; таковы: объем, масса, плотность. Эти величины зовутся **скаларами или скальными величинами** [2]).

§ 49. Закон инерции. — Знакомство с равномерным движением и его скоростью необходимо нам между прочим для того, чтобы усвоить весьма важный „закон инерции", который является решительно во всех случаях движения и покоя физических тел. Содержание этого закона заключается в следующих положениях.

I. **Всякое тело сохраняет свою скорость без изменения, пока какая-нибудь внешняя сила своим действием не прибавит ему добавочной скорости, или, наоборот, не убавит ему скорости, или вообще не внесет изменений скорости.**

Для подтверждения как этого, так и следующих положений приходится не столько приводить примеры, сколько разбивать возможные возражения. Например, могут сказать: „и при наличности внешней силы скорость тела может оставаться без изменения; напр., повозка по ровной дороге движется равномерно, хотя ее непрерывно тянет сила лошади". Но кто говорит так, тот не обратил внимания, что, кроме силы лошади, на повозку действуют различные силы, сопротивляющиеся ее движению (так называемые „сопротивления"): 1) сопротивление неровностей дороги, 2) трение на шейках осей, 3) сопротивление воздуха. Сколько скорости подбавляет повозке сила лошади, столько же убавляют сопротивляющиеся силы. В общем получается движение равномерное.

Без подобных сопротивлений не обходится дело ни в каком опыте, поэтому движение тел, предоставленных самим себе, рано или поздно прекращается. Но если сопротивления очень малы, то раз полученное телом движение продолжается долгое время,

---

[1]) Лат. vector = *ведущий, несущий.*
[2]) От слова *скала.*

как говорится, „по инерции" [1]). Если быстро развертеть колесо, у которого мало трение между втулкой и осью (напр., велосипедное), то оно продолжает вертеться само в течение нескольких минут. Держа концы оси такого колеса в руках, мы заметим, что оно трудно поддается всякому усилию *повернуть его плоскость:* вследствие „инерции" каждая часть движущегося тела стремится сохранить не только величину, но и *направление* скорости в пространстве. Таким образом каждая частица колеса, собственно говоря, стремится оторваться и улететь по касательной к своему криволинейному пути. Такие случаи иногда действительно бывали с дурно рассчитанными маховыми колесами, которые разлетались на куски при быстром вращении. (Подобный же характер имеет явление слетания брызг с колес экипажа в мокрую погоду.)

Совсем не испытывает сопротивлений, повидимому, движение небесных тел; оттого их движения (напр., вращение земного шара вокруг оси) могут длиться тысячелетиями без всякого замедления.

II. Предыдущее положение можно высказать короче: **никакое тело не может само изменить свою скорость.**

Могут возразить: „а вот — я быстро бежал, но захотел — и *сам* остановился". Говорящий так забывает, что при остановке он уперся ногой в землю, которая и остановила его, — подействовала на него задерживающей силой. Если бы здесь была пропасть, то ему не удалось бы остановиться, а пришлось бы продолжать движение по инерции.

III. Из предыдущих положений следует, что **если тело находится в покое, т.-е. имеет скорость = 0, то оно и остается в покое, пока не получит какой-нибудь скорости от внешних сил.**

С первого взгляда этому противоречит такой опыт. На столе лежит доска с горизонтальной поверхностью, на ней лежит шар (или какое-нибудь другое тело). Потянем доску, например, влево. Шара мы не тянем, значит он по закону инерции как будто должен оставаться в покое, отставая от доски ровно на столько, на сколько она уходит вперед; и наконец, он должен бы упасть с доски, находясь все в том же месте, где находился вначале. На самом же деле окажется, что он несколько продвинулся влево (куда и доска). Спрашивается, отчего это происходит? — Причина такого кажущегося несогласия закона с опытом заключается в том, что наш шар не был *вполне* избавлен от действия сил. Как бы гладко он ни был сделан, всегда на нем есть неровности; сцепляясь этими неровностями, как зубцами, с такими же неровностями движущейся доски, он испытывает от нее некоторую тягу, вследствие чего и начинает двигаться в ту же сторону, как она [2]).

---

[1]) Лат. слово inértia означает *косность, недеятельность.*
[2]) Сила, развивающаяся между двумя соприкасающимися телами вследствие того, что на них есть шероховатости, называется *силой трения;* итак, можно сказать, что в данном случае движение возникает благодаря силе трения. Если бы доска и шар были идеально гладкими, то шар не принял бы никакого участия в движении доски.

Физическим законам обыкновенно придают возможно краткую форму, для того, чтобы их легче было запомнить. Но такая краткая форма может быть полезна лишь тому, кто уже усвоил все содержание закона.

Вот как был формулирован закон инерции знаменитым английским физиком конца XVII века Ньютоном:

Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного движения по прямой линии, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

§ 50. Уравнение движения падающего тела. — Станем исследовать, **какое движение получается от постоянного действия силы на свободное тело.** В опытах воспользуемся силой тяжести. Нам нужно иметь метроном, длинный шнурок, к концу которого привязан грузик, метровый масштаб, и еще нужно запастись несколькими небольшими тяжелыми предметами (напр., камушками).

Пусть подвижной грузик метронома помещен на 60-м делении задней скáлы, так что метроном отбивает секунды.

Поместившись на внутренней лестнице высокого здания и пустив в ход метроном, будем ронять из рук камушек при каком-нибудь ударе метронома и замечать, на сколько стук камушка при ударе о площадку опережает следующий удар метронома или запаздывает сравнительно с ним. Изменяя высоту падения камушка, достигнем, наконец, того, чтобы падение продолжалось ровно 1 секунду. При помощи шнурка измерим высоту падения: окажется, что она составляет приблизительно 5 метров.

Заставляя совпасть стук падающего камня с следующим далее [1]) ударом метронома, мы нашли бы, что в две секунды падающее тело проходит приблизительно 20 метров, т.-е. вчетверо больше, чем в первую секунду.

Так как бóльшие высоты едва ли будут в нашем распоряжении, то продолжать опыт, увеличивая рассматриваемые промежутки времени каждый раз по 1 sec, нам не удастся. Придется изменить порядок опыта, взяв более мелкую единицу времени.

Примем за единицу такой промежуток времени, в течение которого камень падает с высоты, равной 1 m (высоту отметим по метровому масштабу). Из опыта найдем, что это время равно промежутку между двумя ударами метронома, если грузик стоит на 133; след. наша единица времени есть 60 sec : 133 = 0.45 sec. Итак, в один такой промежуток времени наш камень проходит 1 m.

Далее опытом найдем, что:

в два	таких	промежутка	времени	камень	пройдет	4 m,
в три	„	„	„	„	„	9 m,
в четыре	„	„	„	„	„	16 m.

[1]) Если бы мы отмечали удары цифрами, то это нужно было бы сделать так: начальный удар считался бы *нулевым* (всякий отсчет в физике начинается от нуля), следующий — первым, еще следующий — вторым, и т. д.

Всматриваясь внимательно в полученные числа, находим закон:

Расстояние, пройденное падающим телом, прямо пропорционально квадрату времени.

Легко этот закон выразить формулой. Назовем промежуток времени от начала падения тела буквой t; квадрат времени будет t^2. Назовем высоту падения буквой h. Формула будет $h = at^2$, где a есть коефициент пропорциональности (см. замечание в конце § 46). Числовое значение этого коефициента будет зависеть от того, в каких единицах мы мерили h и t. Если $t = 1$, то из формулы получится $h = a$; мы видим, что коефициент a *численно* равен расстоянию, проходимому в первую единицу времени (считая от начала падения). Значит, если мы расстояние мерим в метрах, а время, как обыкновенно, в секундах, то $a \cong 5$ [1]). Более точные опыты показывают, что $a = 4.9$ [2]).

Итак, нашу формулу можно переписать в виде:

$$h = 4.9\,t^2,$$

где h — высота падения в метрах, t — время падения в секундах.

Если же будем выражать расстояние h в сантиметрах, то получится:

$$h = 490\,t^2.$$

Каждую из двух последних формул можно назвать **уравнением движения падающего тела** [3]).

Задача. Инженеру нужно узнать глубину шахты. У него нет шнурка, но есть секундомер. Он роняет камень в шахту и замечает по звуку при ударе камня о дно, что камню нужно $3^1/_2$ секунды, чтобы достигнуть дна. Как велика глубина шахты?

Реш. В формулу $h = 4.9\,t^2$ подставляем $3^1/_2$ вместо t. После вычислений получается $h = 60$ m (сопротивление воздуха не принимается в расчет).

§ 51. Падение в воздухе и в пустоте. — Если вместо камушка, который мы роняем в наших опытах, возьмем какое-нибудь другое тело, более тяжелое, но попрежнему имеющее

[1]) Знак $\cong$ означает *приблизительное* равенство двух количеств.

[2]) В разных местах земного шара значение a несколько изменяется (на десятые доли процента). Это свидетельствует об изменении силы тяжести, которая является причиной падения.

[3]) Во всех формулах коефициент при t^2 есть число именованное. Его наименование, очевидно, такое, как у частного $h : t^2$ (следовательно, в предпоследней формуле $\frac{m}{sec^2}$, в последней $\frac{cm}{sec^2}$). В формулах это наименование, ради краткости, не показано; иначе пришлось бы, например, написать: $h = 490\,\frac{cm}{sec^2}\,t^2$.

небольшие размеры, то полученные числовые результаты не будут существенно отличаться от предыдущих. Однако совсем иные получились бы результаты, если бы падал, напр., раскрытый зонтик; проходимые расстояния были бы много меньше.

Рис. 31.

Легко доказать, что наблюдаемая разница в падении тел обусловливается различной величиной сопротивления воздуха; **в пустоте же все тела падают одинаково быстро.** Для доказательства берут длинную стеклянную трубку, в которой находятся несколько тел, тяжелых и легких, и быстро опрокидывают ее: пока в трубке есть воздух, тела падают неодинаково быстро. Затем из трубки выкачивают воздух и повторяют опыт: тела, падая, находятся все время на одинаковой высоте (рис. 31). Впустив воздух в трубку, опять заметим первоначальную разницу.

Указанное в предыдущем § значение $a = 4.9$ относится именно к падению тел в пустоте (или же к случаю, когда сопротивление воздуха почти не заметно).

§ 52. График движения падающего тела. — Будем высчитывать расстояния, пройденные падающим телом от начала падения, пользуясь для простоты формулой $h = 5t^2$ Получится:

Протекшее время	Пройденное расстояние
1 sec	5 m
2 sec	20 m
3 sec	45 m
4 sec	80 m
5 sec	125 m

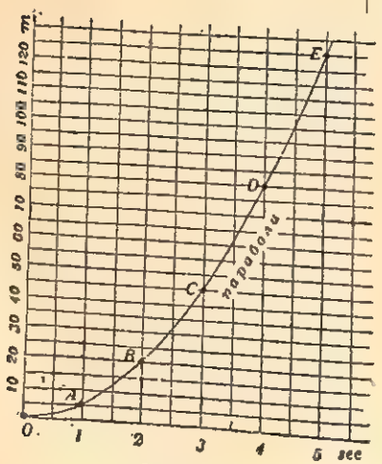

Рис. 32.

Возьмем ось времен и разделим ее на отрезки, означающие секунды; также возьмем ось расстояний и отложим на ней отрезки, означающие метры. Каждую из строчек предыдущей таблицы обозначим на графике точкой. Получим точки A, B, C и т. д. (рис. 32). Сюда же присоединим точку O (которая соответствует началу падения тела). Соединим точки O, A, B, C,.... плавной кривою: это будет график движения падающего тела. Полученная кривая называется **параболой.**

§ 53. Следствия из уравнения движения падающего тела. — Исходя из уравнения $h = at^2$, станем высчитывать, какое расстояние проходится падающим телом в каждую отдельную секунду его движения.

Для этого сначала придется составить таблицу, подобную предыдущей:

Протекшее время	Пройденное расстояние
1 секунда	$a = 4.9$ метра
2 секунды	$4a = 4 \times 4.9$ метра
3 „	$9a = 9 \times 4.9$ „
4 „	$16a = 16 \times 4.9$ „
5 секунд	$25a = 25 \times 4.9$ „
	и т. д.

Теперь вычитанием найдем расстояние, проходимое в каждую отдельную секунду:

в первую	секунду	проходится	$a = 4.9$	метра
во вторую	„	„	$3a = 3 \times 4.9$	„
в третью	„	„	$5a = 5 \times 4.9$	„
в четвертую	„	„	$7a = 7 \times 4.9$	„
в пятую	„	„	$9a = 9 \times 4.9$	„ и т. д.

Мы видим, что каждый последующий член этого ряда на $2a = 2 \times 4.9$ больше предыдущего члена. Ясен следующий закон: **В каждую секунду падения (начиная со второй) тело проходит на $2 \times 4.9 = 9.8$ метра больше, чем в предыдущую секунду.**

§ 54. Об ускорении падающего тела. — Наконец, запишем *среднюю скорость* падающего тела за первую секунду, за вторую секунду и т. д.

За первую	секунду	средняя	скорость	равна	$4.9 \frac{m}{sec}$	
За вторую	„	„	„	„	3×4.9	„
За третью	„	„	„	„	5×4.9	„
За четвертую	„	„	„	„	7×4.9	„
За пятую	„	„	„	„	9×4.9	„ и т. д.

Мы видим, что средняя скорость правильно или, как говорится, „равномерно“ увеличивается через каждую секунду на $2 \times 4.9 = 9.8 \frac{m}{sec}$, через 2 sec на $4 \times 4.9 \frac{m}{sec}$, через 3 sec на $6 \times 4.9 \frac{m}{sec}$ и т. д.

За **меру возрастания скорости** принимают особую величину, которую называют **ускорением** и определяют, как **отношение приращения скорости к соответствующему приращению времени.**

Ускорение тела, падающего в пустоте, прибл. равно, как видим, $6 \times 4.9 \frac{m}{sec} : 3\ sec = 4 \times 4.9 \frac{m}{sec} : 2\ sec = 9.8 \frac{m}{sec} : 1\ sec = \mathbf{9.8 \frac{m}{sec^2}} = \mathbf{980 \frac{cm}{sec^2}}$. Эту величину для краткости (а также ввиду того, что она в различных местах имеет несколько отличные числовые значения) называют буквой g.

Легко видеть, что уравнение движения падающего тела может быть записано так: $h = {}^1/_2\ gt^2$.

§ 55. Зависимость между мгновенною скоростью, временем и ускорением.—Повторим рассуждения предыдущего § в несколько измененном виде, при помощи алгебраических формул. Возьмем два момента времени, отстоящие (в секундах) на t_1 и t_2 от того момента, когда падающее тело начало двигаться. К моменту t_1 тело прошло (в сантиметрах) расстояние $490t^2_1$, к моменту t_2 (более позднему) оно прошло расстояние $490t^2_2$. За промежуток времени от t_1 до t_2 телом пройдено расстояние $490\ (t^2_2 - t^2_1)$. Средняя скорость за этот промежуток времени была $490\ (t^2_2 - t^2_1) : (t_2 - t_1)$ или $490\ (t_2 + t_1)$. Станем по этой формуле вычислять среднюю скорость для постепенно убывающих промежутков времени при t_1, равном, для примера, 2 секундам:

За промеж. времени от	$t_1 = 2$ sec до $t_2 = 3$ sec	сред. скорость равна	2450 $\frac{cm}{sec}$
„ „ „ „	$t_1 = 2$ sec „ $t_2 = 2.1$ sec	„ „ „	1809 „
„ „ „ „	$t_1 = 2$ sec „ $t_2 = 2.01$ sec	„ „ „	1764.9 „
„ „ „ „	$t_1 = 2$ sec „ $t_2 = 2.001$ sec	„ „ „	1760.5 „
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
„ „ „ „	*$t_1 = 2$ sec „ $t_2 = 2$ sec*	„ „ „	*1760* „

Мы последовательно брали промежуток времени $t_2 - t_1$ равным 1 sec, 0.1 sec, 0.01 sec, 0.001 sec; можно было бы мысленно продолжать это уменьшение до предела *нуль*. Если действительно дать промежутку $t_2 - t_1$ это предельное значение (как и сделано в последней, курсивной строчке таблицы), то наш промежуток времени, так сказать, сократится до одного *мгновения*; тогда средняя скорость превращается уже в *мгновенную* или *истинную скорость*, соответствующую моменту $t = 2$ sec. Итак, мы видим, что *формула $490\ (t_2 + t_1)$ представляет выражение истинной скорости падающего тела для любого момента t, если в ней положить $t_2 = t_1 = t$*. Означая истинную скорость для момента t буквою v, будем иметь $v = 490 \times 2t$, или:

$$= \mathbf{980\ t},$$

когда t выражается в секундах, v в $\frac{cm}{sec}$, и

$$v = \mathbf{9.8\ t},\ ^{1)}$$

[1]) Ради краткости в двух последних формулах не показано наименование числового коефициента.

если t выражается в секундах, v в $\frac{m}{sec}$; или, наконец, пользуясь буквенным обозначением ускорения,

$$v = gt.$$

Мы видим, что **истинная скорость тела, падающего в пустоте, растет пропорционально времени.** Коефициент пропорциональности есть **ускорение.**

Законы падения тел были изучены впервые знаменитым итальянским физиком Галилеем (в начале XVII века). Поэтому они называются „законами Галилея“.

§ 56. Действие силы на свободное тело.—Всякое движение, при котором скорость возрастает равномерно, называется **равномерно-ускоренным** [1]).

Произведенное нами исследование движения падающего тела показывает нам, что под действием постоянной силы тело, не имевшее „начальной скорости“ (т.-е. не получившее в начале движения никакого толчка), движется **равномерно-ускоренно.**

§ 57. Движение тела, брошенного по горизонтальному направлению.—Рассмотрим теперь движение тела в том случае, если в момент перехода от покоя к движению оно получает боковой толчок. Пусть A (рис. 33) будет, напр., стальной шарик, который лежал на краю стола и который начинает двигаться оттого, что ему дали щелчок по горизонтальному направлению вдоль линии AA^{IV}.

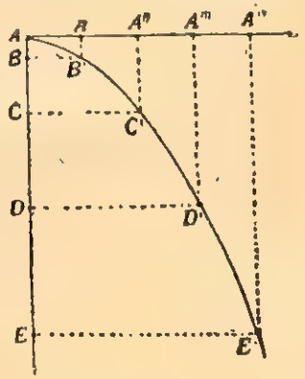

Рис. 33.

Если бы не действовала сила тяжести, а также не было бы сопротивления воздуха, то шарик по инерции сохранял бы полученную скорость без конца: в равные промежутки времени (скажем, в каждую десятую долю секунды) он последовательно проходил бы равные отрезки AA', A'A'', A''A''', A'''A^{IV} и т. д.

Это движение изменяется вмешательством **силы тяжести,** которая **оттягивает тело с пути AA^{IV} вниз ровно на такое же расстояние, на какое подвинула бы она по линии AE тело, падающее без начального толчка.**

В этом смысле говорят: **сила действует одинаково как на тело, получающее движение только от нее одной, так и на тело, движущееся еще от других причин.** Это—**закон независимого действия сил.** Пусть AB, AC, AD, AE будут пути, проходимые телом, падающим без

[1]) Если скорость равномерно убывает, движение называется „равномерно-замедленным“.

начального толчка в $\frac{1}{10}, \frac{2}{10}, \frac{3}{10}, \frac{4}{10}$ секунды. Тогда при наличности указанного выше толчка тело будет находиться: через $\frac{1}{10}$ sec после начала движения—в точке B′, через $\frac{2}{10}$ sec — в точке C′, через $\frac{3}{10}$ sec — в точке D′ и т. д., при чем AB # A′B′ [1]), AC # A″C′, AD # A‴D′ и т. д. Кривая линия AB′C′D′E′, проходимая телом, или, как говорится, **траектория** [2]) его будет *парабола*. Эта парабола будет, понятно, тем более отлогой, чем бо́льшую скорость сообщим телу по горизонтальному направлению.

§ 58. Сложение движений.—Построение рисунка 33 дает пример так называемого **сложения движений**. Движения по линиям AA^{IV} и AE называются **слагаемыми движениями**, а движение по параболе AE′—**сложным движением**. Мы видим, что **место движущегося тела в сложном движении определяется четвертой вершиной параллелограма, построенного на слагаемых движениях**. Это правило называется правилом **параллелограма перемещений**.

Вот еще пример сложения движений из другой области. Пусть машина воздушного корабля A (рис. 34) работает так, что если бы воздух был спокоен, то корабль в течение часа пролетел бы расстояние AC. Но пусть в то же самое время дует ветер, который унес бы корабль в течение часа на расстояние AB, если бы машина не работала. Тогда в действительности обе причины перенесут корабль за это время в D.

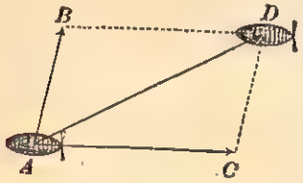

Рис. 34. Сложение движений.

Понятно, что если обе причины движут тело по одному направлению, то тело проходит расстояние, равное сумме расстояний, проходимых в каждом слагаемом движении. Так, если работа машины корабля перемещала бы его в спокойном воздухе на 50 километров в час, и если он, кроме того, летит по ветру, скорость которого 15 km в час, то в общем корабль пролетает 65 km в час.

Если же обе причины движут тело в противоположных направлениях, то тело проходит расстояние, равное разности расстояний, проходимых в слагаемых движениях. Если в предыдущем примере корабль будет лететь против ветра, он будет передвигаться только на 35 km в час.

§ 59. Движение тела, брошенного наклонно к горизонту.—Пусть в начале движения тело получает толчок вдоль линии AA^{IV} (рис. 35), при чем стремится по инерции проходить

[1]) Знак # означает *равенство и параллельность* двух отрезков.
[2]) От лат. trajicio = *перемещаю*.

в каждую секунду отрезок равный AA′. Сила тяжести оттягивает тело с пути AA^{IV} вниз: в первую секунду на A′B ≦ 5 m, в две секунды на A″C ≦ 20 m, в три секунды на A‴D ≦ 45 m и т. д. Траектория ABCDE опять — парабола [1]).

Этот случай движения играет большую роль в военном деле

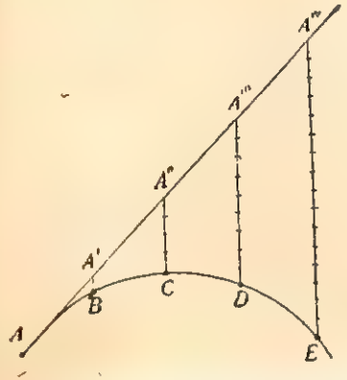

Рис. 35. Сложение движений.

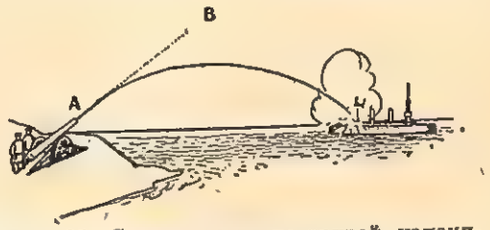

Рис. 37. Снаряд летит по кривой, напоминающей параболу.

(рис. 37): движение пуль и снарядов происходило бы по этому типу, если бы не было сопротивления воздуха.

§ 60. Движение тела, получившего толчок по вертикальному направлению.—а) Если падающему телу в момент начала падения сообщить толчок **вниз**, то закон независимого действия сил скажется так: тело каждую секунду будет проходить путь, указываемый законом Галилея (§ 53), **плюс** путь, который оно проходило бы по инерции под действием одного

[1]) Такую параболу можно наглядно получить, выпуская из трубки струю

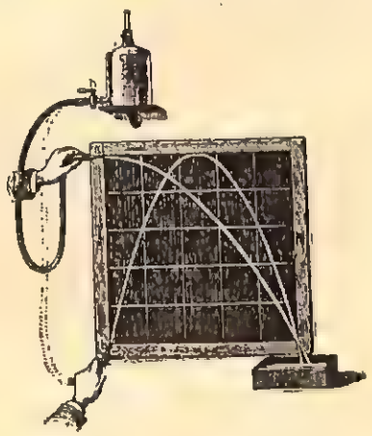
Рис. 36.

воды под давлением, сообщающим воде начальный толчок (рис. 36), как это бывает в умывальниках.

толчка. Например, если толчок сам по себе сообщил бы данному телу скорость $3\frac{m}{sec}$, то тело пройдет: в первую секунду $5+3=8$ m, во вторую $15+3=18$ m, в третью $25+3=28$ m и т. д.

б) Если толчок был дан телу **вверх**, то мы имеем сложение двух движений, направленных в противоположные стороны; тогда расстояния, проходимые по законам Галилея, нужно **вычитать** из расстояний, проходимых по инерции. Если, напр., тело брошено кверху со скоростью $20\frac{m}{sec}$, то в первую секунду оно по инерции прошло бы 20 m кверху; но сила тяжести в течение этой секунды оттягивает его вниз на 5 m, поэтому к концу первой секунды тело в действительности оказывается на высоте 15 m. В течение второй секунды инерция несет тело еще на 20 m кверху, да сила тяжести оттягивает его обратно на 15 m книзу; в общем тело проходит еще 5 m кверху и находится на высоте 20 m. В течение третьей секунды тело по инерции проходит 20 m вверх, и под действием силы тяжести — 25 m вниз: это даст итог 5 m вниз; тело к концу третьей секунды оказывается на высоте 15 m; наконец, в течение четвертой секунды тело проходит 20 m кверху, 35 m книзу — итого 15 m книзу: в конце четвертой секунды оно находится опять на первоначальном уровне.

§ 61. Движение тела по окружности. — В трех разобранных примерах мы складывали движение по инерции с движением, зависящим от силы, постоянной по величине и по направлению. Несколько отличный случай сложения движений имеет место тогда, если тело (скажем — камень, привязанный к нитке, другой конец которой удерживается рукою) описывает окружность.

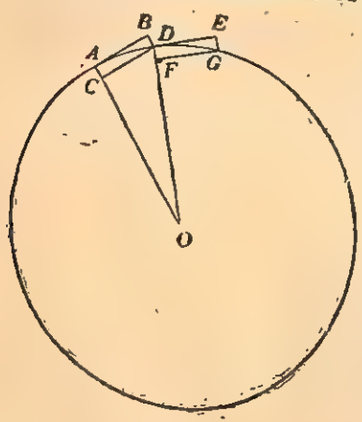

Рис. 38.

Во-первых, и в этом случае ясно, что тело находится под действием силы: если бы оно не находилось под действием силы, то оно двигалось бы по прямой линии, как велит закон инерции.

Во-вторых, ясно, какая сила и по какому направлению действует на камень: это — „натяжение" нити, к которой привязан камень; нить тянет камень к центру окружности, т.-е. к руке. Если нить оборвется, камень устремится по касательной.

Пока нить цела, сила все время направлена к одной и той же точке, а именно к центру окружности; такая сила называется **центростремительною**.

Рассмотрим, каким образом здесь движение по инерции складывается с действием силы. Начнем с момента, когда тело находится в какой-нибудь точке A окружности (рис. 38). В те-

чение очень маленького промежутка времени тело прошло бы вследствие одной инерции путь AB по касательной; в то же самое время сила заставила бы его пройти путь AC по радиусу; в общем, тело по истечении этого промежутка времени очутится в другой точке D на окружности.

Точно так же в течение следующего маленького промежутка времени инерция гонит тело по DE, а сила — по DF; тело в действительности проходит дугу DG, и т. д.

§ 62. О силе центростремительной и центробежной. — От каких обстоятельств зависит величина центростремительной силы? Это можно выяснить опытом с помощью простого прибора — усовершенствованного пружинного безмена. Вставим в разрез, где движется указатель, два кубика из мягкой пробки, один под указателем, а другой над ним (рис. 39). Привязав к крючку безмена небольшую гирьку (граммов в 200), держа его за кольцо и завертев безмен (не очень скоро) так, чтобы гирька приблизительно описывала окружность, мы заметим, что указатель сдвинул *нижнюю* пробку до деления, указывающего центростремительную силу, значительно бо́льшую веса гирьки. Если завертим **вдвое** скорее, то указатель покажет силу **вчетверо** бо́льшую, чем в первый раз. Этот опыт можно сделать довольно акуратно, если воспользоваться метрономом и соразмерять число оборотов гирьки с его ударами.

Рис. 39.

Если привяжем к крючку безмена **вдвое** бо́льшую массу и повторим опыт, соблюдая то же число оборотов в единицу времени, как и в первый раз, то окажется, что центростремительная сила — **вдвое** больше, чем в первом опыте.

Наконец, можно менять радиус окружности, по которой движется гирька. Привязав к кольцу безмена веревочку, будем держать в пальцах то или другое место веревочки, с таким расчетом, чтобы радиус вращения был в несколько раз больше, чем тогда, когда держали безмен непосредственно за кольцо. Гирька пусть будет та же, и число оборотов в единицу времени то же, как в первом опыте. Окажется, что центростремительная сила увеличилась во столько раз, во сколько увеличили радиус [1]).

Эти опыты поясняют нам закон центростремительной силы, который еще в XVII веке был выведен при помощи точных рассуждений. Он гласит: **центростремительная сила F пропорциональна массе тела m, радиусу описываемого круга r и квадрату числа оборотов в единицу времени (напр., минуту) n; или**

$$F = kmrn^2$$

[1]) Эти опыты довольно трудны; особенно трудно измерить правильно радиус. Надо также тщательно избегать вращения более быстрого, чем следует по условиям опыта: устройство прибора таково, что он всегда показывает *наибольшее* значение силы, какое встречалось в течение опыта.

где величина коефициента пропорциональности k зависит от единиц, которыми меряются величины, входящие в формулу.

Силовое действие в наших опытах имеет, очевидно, *обоюдный* характер. С одной стороны, пружина безмена (и веревочка) тянут тело к центру. С другой стороны, очевидно, здесь тело развивает силу, с которою оно тянет безмен **от** центра. Эта сила через кольцо безмена (и через веревочку) передается руке, и рука ощущает ее. Эта сила называется **центробежной**. Центробежная сила по своему направлению противоположна центростремительной, а по величине, очевидно, равна ей. В самом деле, показание безмена, включенного между двумя телами, которые тянут друг друга (гирька и рука), очевидно, относится к действию обоих тел (все равно, как если бы два человека тянули безмен в противоположные стороны, держа его — один за крючок, другой — за кольцо: безмен указывал бы силу, развиваемую каждым из них).

Если какое-нибудь тело (напр., маховое колесо, рис. 40) вращается около оси, то каждая его часть (напр., частица, показанная черным пятнышком на рисунке) развивает центробежную силу, стремясь разорвать свое сцепление с остальными частями. Центробежная сила (как и равная ей центростремительная) пропорциональна квадрату числа оборотов в единицу времени; с увеличением скорости вращения колеса, напр., в 10 раз, центробежная сила увеличится в 100 раз. Поэтому-то и случаются опустошительные разрывы маховиков паровых машин, мельничных жерновов и наждачных шлифовальных кругов. У паровых машин это бывает тогда, если передаточный ремень разорвется (так что вся энергия, подаваемая машиной, пойдет не на работу, а на увеличение кинетической энергии маховика, вследствие чего последний начнет вращаться с очень большой скоростью), и если регулятор неисправен и во-время не закроет доступ пара.

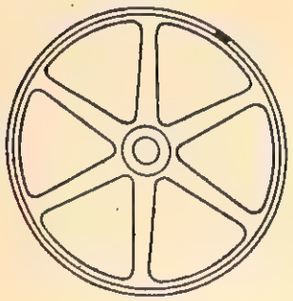

Рис. 40.

§ 63. Закон действия и противодействия. — Равенство силы центростремительной и центробежной есть проявление общего закона, заключающегося в следующем:

Если какое-нибудь тело с известной силой действует на другое тело, то и второе тело действует на первое с силой, равной по величине, но направленной в противоположную сторону.

Одну из этих сил называют **действием**, а другую — **противодействием**. Закон называется **законом действия и противодействия**.

Приведем несколько примеров.

1. Пусть на столе лежит груз в 1 kg. Он давит на стол с силою в 1 kg* по вертикальной линии вниз (действие). Но и **стол давит на груз с силою в 1 kg* по направлению вверх** (противодействие) [1].

2. Если два человека помещаются один за другим на двух легких платформах, снабженных колесами и стоящих на гладком полу, и если один станет рукой отталкивать от себя другого, то и сам оттолкнется от него: обе платформы приходят в движение [2]). Если человек, стоящий на такой платформе, сойдет с нее, платформа откатывается в противоположную сторону: это показывает, что мы при ходьбе отталкиваем от себя ту поверхность, по которой идем.

3. Когда лошадь тянет повозку, то и повозка тянет лошадь в обратную сторону с такой же силой; и если бы мы между повозкой и лошадью включили динамометр, то он показал бы нам, с какой силой лошадь и повозка тянут друг друга. Иногда возражают: „если бы лошадь и повозка тянули друг друга с равной силой, лошадь не могла бы тянуть повозку в свою сторону; ясно, что лошадь тянет повозку сильнее, чем повозка тянет лошадь“. Но такое рассуждение неверно. Дело в том, что здесь в явлении участвует еще третье тело — земля; лошадь копытами отталкивает землю, поэтому и земля с равной силой отталкивает лошадь: благодаря этому лошадь движется вперед, а за ней — повозка [3]).

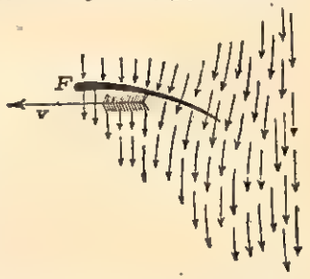

Рис. 41. Крыло аэроплана F, двигаясь по направлению стрелки v, производит струи в воздухе.

4. Пусть аэроплан летит горизонтально. Так как он не падает, несмотря на действие силы тяжести, то значит на него действует сила, направленная вверх, уравновешивающая силу тяжести. Такой силой является **отталкивание крыльев аэроплана от воздуха**; отталкивание же это связано с тем, что крылья аэроплана сами толкают воздух вниз (для чего им придается форма, показанная в разрезе на рис. 41).

---

[1]) Отсюда легко понять, что груз остается в покое: его тянет вниз сила тяжести, равная 1 kg*, и его толкает вверх давление стола, равное также 1 kg*; эти две силы, действуя вместе, не производят никакого движения: они „уравновешиваются“, подобно тому, как уравновесились бы силы двух людей, которые одинаково сильно толкали бы салазки в противоположные стороны.

[2]) Если подобной платформе придать длину $1\frac{1}{2}$—2 m, на ней можно удобно прослеживать различные проявления инерции. Напр., если человек сначала стоит на платформе, а затем пойдет по ней вперед, то платформа станет на столько же откатываться назад: человек окажется на прежнем месте по отношению к стенам комнаты.

[3]) Дело происходит так же, как если бы мы, держа в руках пружинные весы с привешенным к ним грузом, поднимали их или опускали. Когда мы держим в руках весы с грузом неподвижно, то удлинение пружины указывает нам, с какой силой груз тянет пружину, а пружина — груз; мы можем ввести на сцену третье тело — руку, которая станет двигать (например, кверху) и пружину и груз; тем не менее в каждый момент „действие“ груза на пружину будет равно „противодействию“ пружины на груз (хотя во время движения эта сила будет равна весу груза лишь в том случае, если движение — прямолинейное равномерное).

Чтобы гнать поток воздуха таким образом, аэроплан должен все время быстро лететь вперед; это достигается действием воздушного винта, т. наз. *„пропелера“* [1]), который также отталкивается от воздуха, но уже в горизонтальном направлении.

ГЛАВА V.

Законы равновесия и движения. Параллелограм сил.

§ 64. Равновесие двух сил.—Нам уже не раз встречался случай, когда тело под действием двух равных сил, направленных в противоположные стороны, или остается в покое, или же движется равномерно по прямой линии (т.-е. так, как если бы на него *не* действовали силы). Ясно, что действие таких двух сил *в смысле движения тела* сводится к нулю [2]).

Бывают случаи гораздо более сложные, когда инженеру, конструктору и вообще человеку техники надо бывает знать, к какому общему итогу сводится действие *каких-нибудь* сил. Мы займемся изучением основных случаев этого рода.

§ 65. Сложение сил, действующих по одной прямой.—Если мы прицепим к пружинным весам сразу две гири, одну в 2 kg, другую в 5 kg то результат будет такой, как если бы мы сразу прицепили к ним один груз в 7 kg. Здесь сила в 7 kg* производит *действие равное* тому, какое производят две силы в 2 и 5 kg*, поэтому она называется **равнодействующей** их. Мы имеем **правило:**

Равнодействующая сил, направленных по одной линии в одну сторону, равна их сумме и направлена в ту же сторону.

Если один человек толкает санки вперед с силой 70 kg*, а другой в то же время толкает их назад с силой в 50 kg*, то результат будет такой, как если бы толкали санки вперед с силой 20 kg*. Итак:

Равнодействующая двух сил, направленных в противоположные стороны, равна их разности и направлена в сторону большей силы.

Нахождение равнодействующей двух или нескольких сил называется вообще **сложением** сил; соединяемые силы зовутся **слагаемыми** или **составляющими**.

§ 66. Сложение сил пересекающихся.—Теперь рассмотрим случай, когда две силы действуют на одну и ту же точку тела под углом. Пусть, напр., гиря в R kg (рис. 42) висит на шнурке RE

---

[1]) Англ. propeller = *движитель*.

[2]) Оно *не* сводится к нулю в смысле изменения формы тела: две силы, *тянущие* тело в разные стороны, *растягивают* его, а две силы, *толкающие* тело в противоположные стороны, *сжимают* его.

и поддерживается в равновесии шнурками EC и ED, привязанными к крючкам двух пружинных безменов, из которых один показывает P kg*, другой Q kg*. Ясно, что здесь две силы P и Q, действующие под углом CED, производят такой же результат, какой произвела бы одна сила R, направленная *вверх* по продолжению вертикальной линии RE. Эта сила R есть равнодействующая слагаемых сил P и Q. Спрашивается: какое соотношение между силами R, P и Q?

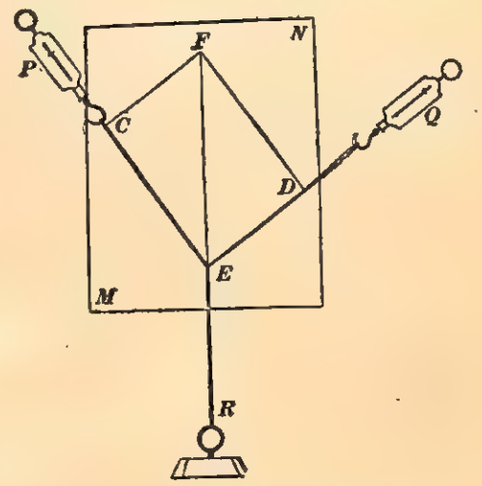

Рис. 42. Параллелограм сил.

Если мы на доске MN прочертим линии шнурков, отложим на этих линиях отрезки EC, ED и EF, пропорциональные силам P, Q и R, и, наконец, соединим точку F с точками C и D, то четыреугольник ECFD окажется параллелограмом.

Итак, **равнодействующая двух сил, действующих на одну и ту же точку тела под углом, выражается диагональю параллелограма, построенного на слагаемых силах. Это—правило параллелограма сил** [1]).

Здесь мы **условно выражаем каждую силу отрезком, направление которого одинаково с направлением силы, и длина которого пропорциональна величине силы.** Такой способ графического изображения сил чрезвычайно распространен в физике.

§ 67 Лабораторная работа № 9.—*Проследить зависимость между двумя пересекающимися силами и их равнодействующей.*

Необходимые предметы: 1) три пружинных безмена на общем кольце; крючки сняты, вместо них привязаны шнурки; 2) квадратная деревянная доска с гвоздями по бортам; 3) лист бумаги с начерченным кругом, разделенным на градусы, и несколькими малыми концентрическими кругами; 4) линейка, разделенная на миллиметры; 5) транспортир; 6) карандаш, остро очиненный; 7) кнопки.

Упражнение распадается на 2 части: подготовительную и основную.

Способ выполнения. А. Подготовительная часть. 1) Закрепить шнурки безменов I и II у гвоздей доски.

2) Шнурок безмена III держать в руке, сохраняя показание этого безмена постоянным. Натягивать шнурок не сильно, чтобы не уставала рука.

---

[1]) Мы замечаем, что вообще векторные величины (как перемещения, скорости, силы) складываются по правилу параллелограма.

3) Проследить, как меняются показания безменов I и II при изменении направления безмена III.

а) Когда показание безмена I бывает равно 0? Какое соотношение тогда между показаниями безменов II и III?

б) Когда показание безмена II бывает равно 0? Какое соотношение тогда между показаниями безменов I и III?

в) Могут ли быть показания безменов I и II равными? Каково тогда бывает положение безмена III?

4) Повторить опыт три раза, меняя взаимное расположение безменов I и II (для этого нужно точки прикрепления шнуров сближать или удалять), но сохраняя показание безмена III постоянным.

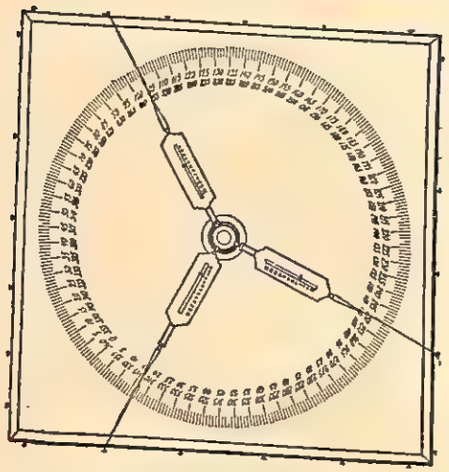

Рис. 43.

Вопрос. При равенстве показаний безменов I и II — равно ли каждое из них половине показания безмена III? Если нет, то не зависит ли оно от угла между безменами I и II?

Б. Основная часть. 1) Натянуть все три нити безменов так, чтобы кольцо пришлось приблизительно посередине доски. Закрепить их. Мы имеем три силы F_1, F_2, F_3. Как следует назвать силу F_3 по отношению к силам F_1, F_2? (*Уравновешивающею.*)

2) Положить на доску под безмены лист с разделенным кругом так, чтобы кольцо было концентрично с начерченными кругами (рис. 43). Приколоть лист кнопками к доске, при чем стараться не делать в листе новых проколов, а пользоваться старыми.

3) Отсчитать показания всех трех безменов и тех делений разделенного круга, на которых пришлись нити; все отсчеты записать в следующую таблицу.

№ опыта	Показания безменов			Деления круга			Углы между силами		
	F_1	F_2	F_3	n_1	n_2	n_3	α_{12}	α_{23}	α_{31}

4) Высчитать и записать в таблицу значения углов α_{12}, α_{23}, α_{31} [1]). Для проверки убедиться, что $\alpha_{12}+\alpha_{23}+\alpha_{31}=360°$.

[1]) α_{12} (читать: альфа один-два) означает угол между направлениями безменов I и II, и т. д.

5) Считая силы F_1 и F_2 составляющими, построить графически их равнодействующую:

а) Провести прямую и отложить на ней отрезок OA (рис. 44), равный стольким сантиметрам[1]), как велико числовое значение F_1;

б) провести через O прямую под углом α_{12} к OA (угол строить при помощи транспортира);

в) отложить на этой прямой отрезок OB, представляющий графически силу F_2;

г) провести прямую OD под углом α_{13} к OA; измерить ∠BOD и сравнить его с α_{23};

д) отложить на OD отрезок, равный F_3;

е) на продолжении OD в противоположную сторону отложить отрезок $OC=F_3$; соединить C с B и A;

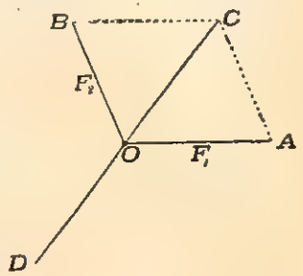

Рис. 44.

ж) сравнить угол BOC с OCA и угол BCO с COA. Что отсюда следует? Какою силою можно заменить силы F_1 и F_2?

6) Отпустив нити I и II безменов, взять в руки нить одного из них и натянуть ее так, чтобы безмен III давал прежнее показание, и чтобы кольцо оставалось на прежнем месте.

7) Отсчитать показание безмена, удерживаемого руками (назовем это показание R), а также деление круга (n), на котором приходится нить этого безмена. Как назвать силу R по отношению к силам F_1 и F_2?

8) Сравнить числовые значения:

$$R \text{ с } OC,$$
$$(n-n_1) \text{ с } \angle AOC.$$

9) Повторить опыты 1—8 еще 4 раза, стараясь, чтобы угол между F_1 и F_2 равнялся 30°, 60°, 90°, 120°.

§ 68. Подвесная железная дорога. — Мы найдем простое применение параллелограма сил в устройстве канатной железной дороги. Такая дорога может служить, напр., для транспорта между двумя фабричными зданиями. Она состоит из натянутого между обоими зданиями крепкого проволочного каната (называемого „несущим“ канатом), по которому с помощью более тонкого „тягового“ каната передвигается вагонетка (рис. 45). Один конец несущего каната закреплен в стене правого здания, а другой перекинут через ролик и отягощен грузом Q, туго натягивающим канат. Чем больше груз Q, тем менее будет провешиваться канат под тяжестью данной вагонетки (почему?).

Предположим, что оба конца несущего каната находятся на расстоянии 60 m друг от друга и на высоте 13 m над поверхностью земли, что посередине фабричного двора находится сарай

[1]) Или произвольным линейным мерам, смотря по удобству.

высотой 7 m, и что высота вагонетки 2 m, а вес ее вместе с грузом — до 400 kg. Пусть по соображениям безопасности необходимо, чтобы вагонетка, проходя над крышей сарая, отстояла от нее не менее, чем на 1 m. Таким образом провес каната не должен составлять более чем (13—7—2—1)=3 m. Поставим себе вопрос, как велик должен быть натяжной груз Q для того, чтобы провес каната не мог превзойти этой величины?

Как в опыте рис. 42, — то место несущего каната, под которым находится вагонетка, служит „точкой приложения“[1]) трех

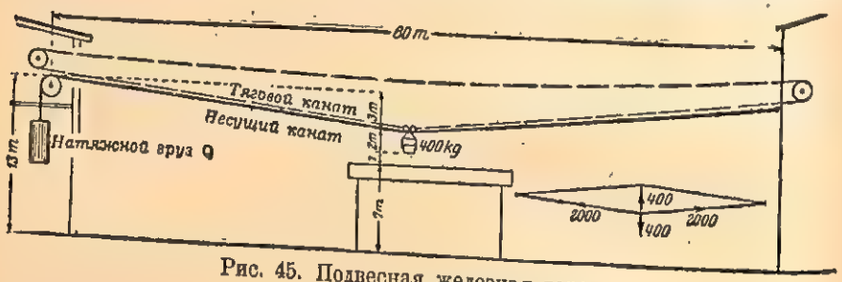

Рис. 45. Подвесная железная дорога.

сил: силы веса вагонетки и натяжений двух половин каната. Эти натяжения уравновешиваются силой веса вагонетки; следовательно, равнодействующая этих натяжений будет равна 400 kg* и направлена вертикально вверх. Начертим для данного случая параллелограм сил, условившись относительно масштаба: пусть, напр., каждые 10 kg* изображаются отрезком в 1 mm. Строим направленный кверху вектор, равный 400 kg*; из верхнего и нижнего концов этого вектора проводим линии, параллельные обеим половинам каната. Получится параллелограм (изображенный в маленьком виде на рис. 45, внизу), в котором нижние стороны будут графически изображать в принятом масштабе натяжения половин каната. Измеряя в миллиметрах эти стороны, найдем, что натяжения эти равны 2000 kg*. Отсюда Q=2000 kg.

§ 69. Расчет консоли.—Консолью называется балка, одним концом закрепленная в стене, а на другом конце удерживаемая

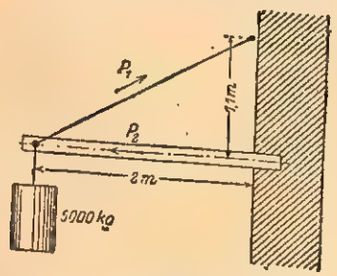

Рис. 46а. Консоль.

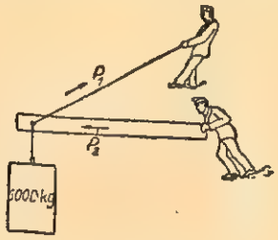

Рис. 46б.

[1]) Точка, на которую непосредственно действует сила, называется точкой приложения силы.

прикрепленным также к стене косым стержнем — „укосиной“ (рис. 46а). Такое устройство может служить для прикрепления блока или лебедки, поднимающих тяжести. Пусть на конце консоли висит груз в 5000 kg; длина балки 2 m, расстояние мест прикрепления балки и укосины к стене — 1.1 m; требуется найти те „напряжения“[1]) P_1 и P_2, которые развиваются в укосине и в балке, и которые на рис. 46б наглядно представлены, как результат действия двух людей, из которых один толкает балку, а другой тянет укосину.

Рис. 47.

Искомые напряжения, передаваясь до точки прикрепления груза, уравновешивают его; поэтому равнодействующею P_1 и P_2 будет сила, равная 5000 kg* и направленная кверху. Параллелограм сил (рис. 47) чертится так: строим вертикальную силу = =5000 kg*, и черезконцы ее проводим линии, соответственно параллельные балке и укосине. Измерение покажет, что P_1 = 10 400 kg*, P_2 = 9100 kg*.

§ 70. Разложение сил. Наклонная плоскость. — Всякую данную силу можно рассматривать, как равнодействующую, и заменить двумя составляющими, по правилу параллелограма. Рассмотрим несколько примеров, где разложение силы приносит пользу.

Пусть AB (рис. 48) будет наклонная плоскость, на которой находится тело S. Силу притяжения земли на это тело выразим графически отрезком SG (на конце этого отрезка поставим стрелку для того, чтобы было сразу видно, в какую сторону направлена рассматриваемая сила). Разложим силу SG на две составляющие, из которых одна SP параллельна наклонной плоскости, а другая SN перпендикулярна ей[2]). SN будет только прижимать тело к наклонной плоскости[3]), вызывая трение; SP будет двигать тело вдоль наклонной плоскости[4]). Сила трения будет сопротивляться этому движению; но мы сначала допу-

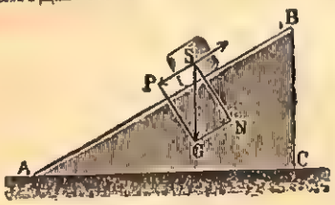

Рис. 48. Наклонная плоскость.

[1]) *Напряжением* здесь называется сила, передающаяся по всей длине балки или стержня. Происхождение напряжения легко понять на следующем примере: пусть вертикальный столб стоит на земле, и сверху на него давит сила в 1 t*. Тогда верхние частицы стержня будут прижаты с силой в 1 t* к соседним с ними частицам. Отсюда сжатие с той же силой распространяется к следующему ряду частиц, и т. д. до нижнего конца. В результате выходит, что какое бы сечение столба мы ни вообразили, находящиеся здесь частицы сжаты с силою в 1 t*. Это и есть „напряжение“.

[2]) Для этого достаточно через точки S и G провести по две прямые, одну ∥ AB, другую ⊥ AB.

[3]) Сила SN, можно сказать, уничтожается (в смысле движения) противодействием наклонной плоскости.

[4]) На рисунке показана еще сила, тянущая тело вдоль плоскости вверх; но эту силу мы пока будем считать несуществующей.

стим, что трение так мало, что на него можно не обращать внимания. Так это будет, напр., в случае, если плоскость AB очень гладка, и если тело S представляет собою гладкий шарик.

§ 71. Движение по наклонной плоскости (без трения). Пропорциональность между силой и ускорением. — Придав наклонной плоскости такое устройство, чтобы можно было давать ей разные уклоны, и имея метроном, можно исследовать движение по ней шарика. Оказывается, что движение будет равномерно-ускоренное (это и понятно, так как шарик движется под действием постоянной силы SP); ускорение же будет во столько раз меньше ускорения свободно падающего тела 9.8 $\frac{m}{sec^2}$, во сколько раз сила SP меньше силы веса SG,—другими словами, во сколько раз „высота" BC наклонной плоскости меньше „длины" ее AB (так как BC:AB = SP:SG, вследствие подобия треугольников ABC и GSP).

Этот факт чрезвычайно важен: он показывает, что **при действии разных сил на одно и то же тело сила пропорциональна ускорению.**

§ 72. Зависимость между силой, массой и ускорением.— Мы знаем, что все тела (при отсутствии сопротивления воздуха) падают с одним и тем же ускорением, и что сила веса тел пропорциональна их массе. Отсюда имеем право заключить, что **при одном и том же ускорении сила пропорциональна массе** [1]).

Оба последние закона можно соединить в одну формулу. Если p означает силу, приложенную к массе m и сообщающую ей ускорение g, то

$$p = kmg,$$

где k—коефициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц для p, m, g. Легко, напр., сообразить, что если p мерить в килограмм-силах, m в килограмм-массах, g в $\frac{m}{sec^2}$, то $k = \frac{1}{9.8}$; если, оставляя те же единицы для p и для m, выражать g в $\frac{cm}{sec^2}$, то $k = \frac{1}{980}$. Однако чаще пользуются этой формулой при другом условии, которое состоит в следующем: вместо прежних единиц силы выбирают новую — такую, чтобы k равнялось единице. Удобство здесь то, что формула упрощается: она будет

$$p = mg,$$

т.-е. просто: **сила равна произведению массы на ускорение.**

Замечание. Отсюда следует, что при действии одной и той же силы на разные тела они будут получать ускорения, обратно

[1]) Это подтверждается еще сделанным нами наблюдением над центробежной силой (§ 62).

пропорциональные их массам. Это подтверждается обыденными опытами в таком роде: пусть имеется мебель на колесиках, которую мы передвигаем; прилагая одну и ту же силу к разным предметам, мы найдем, что скорость движения рояля возрастает гораздо медленнее, чем скорость кресла.

§ 73. Единицы силы: дин и стэн. — Пусть масса тела m = 1 грамму, и ускорение его = 1 $\frac{cm}{sec^2}$ (т.-е. скорость его через каждую секунду увеличивается на 1 $\frac{cm}{sec}$). Подставляя эти числа в формулу p = mg, мы узнаем, как велика сила, которая данной массе сообщает данное ускорение. Очевидно, получится p = 1 с наименованием $\frac{g \times cm}{sec^2}$.

Такая единица силы получила название **дин.** Это — очень мелкая единица; будучи удобной для физики, она неудобна для техники[1]). В технике применяется единица силы, называемая **стэн**[2]); это—сила, которая массе в 1 тонну сообщает ускорение 1 $\frac{m}{sec^2}$; ее „символическое" обозначение 1 $\frac{t \times m}{sec^2}$.

§ 74. Законы движения в совокупности. — Мы теперь ознакомились со всеми основными законами движения. Полезно повторить их вместе.

Первый закон движения или *закон инерции.* **Тело сохраняет направление и величину своей скорости, пока и поскольку приложенные силы своим действием не изменяют этой скорости.**

Второй закон движения или *закон независимого действия сил.* **Данная сила действует на данное тело определенным образом, независимо от того, находится ли это тело в покое или в движении, а именно: она сообщает телу ускорение, пропорциональное величине силы и обратно-пропорциональное массе тела. Направление сообщаемого ускорения совпадает с направлением силы.**

Третий закон движения или *закон действия и противодействия.* **Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны и направлены в противоположные стороны.**

[1]) Легко сообразить, что дин почти равен силе тяжести одного миллиграмма. В самом деле, из формулы p = mg получается $m = \frac{p}{g}$; здесь p выражается в динах, m—в граммах, g—в $\frac{cm}{sec^2}$. Мы хотим определить массу, на которую сила тяжести действует одним дином; поэтому вместо p мы должны вставить 1 дин или 1 $\frac{g \times cm}{sec^2}$, вместо g — ускорение силы тяжести, 980 $\frac{cm}{sec^2}$; получим m =

$$= 1 \frac{g \times cm}{sec^2} : 980 \frac{cm}{sec^2} = \frac{1}{980} g, \text{ или } 1{,}02 \text{ миллиграмма.}$$

[2]) Слова *дин* и *стэн* произведены от греч. слов dynamis и sthênos, означающих *силу.*

§ 75. Применение наклонной плоскости к расчету дорог.—Чтобы сохранять равновесие тела на наклонной плоскости без трения, нужно было бы приложить к нему силу, равную и противоположную SP (такая сила показана на рис. 48).

Но если тело под действием определенных сил находится в покое, то оно может, под действием тех же сил, находиться и в равномерном прямолинейном движении [1]). Поэтому для равномерного поднятия тела вдоль наклонной плоскости (без трения) достаточно тянуть тело с силой, величина которой равна $SP = SG \times \frac{BC}{AB} = SG \times \sin A$. Чем более отлога наклонная плоскость, тем легче такое поднятие.

Если имеется трение, то оно сопротивляется движению, так же как сила SP; следовательно, придется, при равномерном подъеме тела, увеличить поднимающую силу на величину, равную трению. Опыты показывают, что трение пропорционально давлению SN на путь, след., оно выражается формулой $k \times SN = k \times SG \times \frac{AC}{AB} = k \times SG \times \cos A$, где коефициент пропорциональности k, называемый „коэфициентом трения", зависит от свойств поверхности как самой наклонной плоскости, так и движущегося по ней тела. Коефициент трения всегда есть правильная дробь [2]).

В дорожном деле отношение $\frac{BC}{AC}$ (где AC есть так наз. „заложение" дороги, т.-е. проекция длины участка дороги на горизонтальную плоскость, а BC—разность высот начала и конца этого участка) называется „уклоном". При малом уклоне (как это обычно бывает на практике) заложение AC почти не отличается от длины пути AB, значит за уклон можно принять и отношение $\frac{BC}{AB}$. Выйдет, что если, например, говорят: „уклон пути равняется 0.1%, или одному метру на километр", то это значит, что, пройдя километр по этому пути, мы поднимаемся на 1 метр, или на 0.001 пройденного расстояния.

Задача. Вес повозки, поднимающейся равномерно по наклонному пути, равен Q. Уклон пути равен n. Коефициент трения равен k. Найти силу тяги F. Применить найденное общее решение к следующим частным случаям:

1) шоссе с уклоном 0.1% и коефициентом трения $^1/_{40}$;
2) шоссе с уклоном 5% и коефициентом трения $^1/_{40}$;
3) железная дорога с уклоном 0.1% и коефициентом трения 0.003;

[1]) Это вытекает из закона инерции и закона независимого действия сил.

[2]) Если бы движение происходило по горизонтальной плоскости, то сила, прижимающая тело к этой плоскости, просто равнялась бы силе веса тела, а сила трения равнялась бы произведению силы веса на коефициент трения k. Если, напр., k = 0.01, то сила трения составляла бы сотую часть силы веса тела.

4) железная дорога с уклоном 1% и коефициентом трения 0.003.

Решение. Составляющая SP силы тяжести в данном случае равна nQ, сила трения равна $kQ : \sqrt{1+n^2}$. Сила тяги будет равна сумме этих двух сил, или $F = Q(n + k : \sqrt{1+n^2})$. Эта формула упрощается: n есть небольшая дробь, n^2 будет еще гораздо меньше, так что по сравнению с единицей можно n^2 просто откинуть [1]). Выйдет $F = Q\ (n + k)$.

Частные случаи. 1) $F = Q(0.001 + 0.025) = 0.026\,Q$; 2) $F = Q(0.05 + 0.025) = 0.075\,Q$; 3) $F = Q\ (0.001 + 0.003) = 0.004\ Q$; 4) $F = Q\ (0.01 + 0.003) = 0.013\ Q$.

Замечание. Мы видим, что чем меньше коефициент трения (т.-е. чем лучше дорога), тем большее влияние имеет уклон на трудность пути. Вот почему не жалеют денег и труда, чтобы устраивать на хороших дорогах достаточно отлогие подъемы. Особенно важно это для железных дорог: здесь трение очень мало, а потому паровоз, способный везти большой поезд на горизонтальном пути, не смог бы поднять его на сколько-нибудь значительный уклон. Эта разница менее заметна на дурной дороге, так как здесь и на горизонтальном пути сила тяги составляет значительную часть веса повозки (на грунтовых дорогах—до 0.1).

§ 76. Движение аэроплана.—Мы уже знаем из § 63, что крылья аэроплана поддерживаются силой воздуха: поток воздуха, толкаемый крыльями вниз, и сам толкает крылья в противоположном направлении. На рис. 49 вектор D изображает силу действия воздуха на крыло FF. Эту силу полезно разложить по правилу параллелограма на две составляющие, вертикальную T и горизонтальную R. [2]) Сила T побеждает силу тяжести машины G; сила R есть сопротивление воздуха движению аэроплана; она вычитается из силы V, которая создается движением пропелера P и гонит аэроплан вперед.

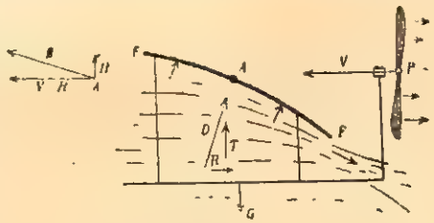

Рис. 49. Полет аэроплана.

Если T = G, то аэроплан движется вперед, оставаясь на одной высоте; если T < G, он постепенно падает, если же T > G,

[1]) Даже если n = 10%, т.-е. = 0,1, то $n^2 = 0.01$, $\sqrt{1+n^2} = \sqrt{1.01} = 1.0\,5$; таким образом величина корня здесь отличается от единицы только на $^1/_2$%. На этот корень множится коефициент трения, а в коефициенте трения даже ошибка в 1% не имела бы никакого значения.—Заменив таким образом $k : \sqrt{1+n^2}$ через k, мы видим, что сила трения выходит одинаковою как на горизонтальном, так и на наклонном пути: она всегда составляет k-ую часть силы веса повозки.

[2]) Эти составляющие показаны на рисунке вне связи с параллелограмом, притом—без соблюдения масштаба.

то он поднимается. В этом последнем случае сила V—R складывается по правилу параллелограма с силой H, представляющей собою разность T—G, и дает равнодействующую B, которая будет двигать аэроплан наклонно вверх.

ГЛАВА VI.

О движении и равновесии твердого тела. Закон моментов.

§ 77. Определение твердого тела.—**Твердым телом называют тело, которое представляет значительное сопротивление всякому усилию, стремящемуся изменить его объем или форму.**

Тем не менее всякое, даже самое твердое тело действием внешних сил может быть сжато, согнуто, растянуто, скручено,—вообще подвергнуто той или иной **деформации** [1]).

§ 78. Движение поступательное и вращательное.—Наиболее простыми движениями твердого тела являются *поступательное движение* и *вращение*.

При поступательном движении все точки тела движутся совершенно одинаково. Пример: движение поезда (если не обращать внимания на движение колес, частей паровой машины и некоторые другие мелкие отступления).

При вращении одна прямая в теле (называемая **осью вращения**) **остается неподвижной, а все остальные точки тела описывают окружности около этой прямой.** Пример: движение маховика.

Очень часто поступательное движение соединяется с вращением. Пример: движение колеса повозки. Иногда в результате такого соединения получается **винтовое движение**, подобное движению винта в гайке.

Задача. Два шкива (т.-е. колеса с плоскими ободами), соединенные перекинутым через них ремнем (рис. 50), составляют так. наз. *ременную передачу*. Если ремень достаточно натянут, то между ремнем и шкивами развивается значительное трение, которое не позволяет ремню скользить по шкивам. Тогда—с какою скоростью движутся точки на окружности одного шкива, с такою же скоростью будут двигаться и ремень и точки на окружности другого шкива. Если диаметр одного шкива 150 см,

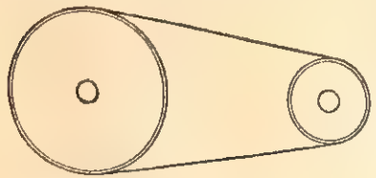

Рис. 50. Ременная передача.

[1]) Лат. deformátio=*искажение*.

другого 30 см, и если первый шкив делает 40 оборотов в минуту, то сколько будет делать второй?

Реш. Обозначим диаметры шкивов d_1 и d_2, числа оборотов в минуту n_1 и n_2. При одном обороте, точки на окружности того и другого шкива будут проходить расстояния πd_1, πd_2; в секунду эти точки пройдут $\frac{n_1 \times \pi d}{60}$ и $\frac{n_2 \times \pi d_2}{60}$. Из условия видно, что эти величины равны; след., $n_1 d_1 = n_2 d_2$. Это значит, что числа оборотов шкивов в минуту обратно-пропорциональны диаметрам.

Так как по условию у первого шкива диаметр в 5 раз больше, чем у второго, то число оборотов у второго в 5 раз больше, чем у первого; оно равно 200.

§ 79. Центр массы. — Одна и та же сила, будучи различным образом „приложена" к твердому телу, может сообщить ему либо поступательное движение, либо поступательное, соединенное с вращательным.

Это можно показать на следующем опыте: возьмем доску, употреблявшуюся в работе § 67, положим ее на гладкий стол [1]); привяжем шнурок к одному из гвоздей на краю ее; мы увидим, что если тянуть за шнурок так, чтобы направление его проходило через определенную (а именно центральную) точку доски [2]), то доска будет двигаться только поступательно; в противном случае она еще станет поворачиваться.

Отсюда мы видим, что **в твердом теле есть одна точка, обладающая следующим свойством: если направление силы, приложенной к твердому телу, проходит через эту точку, тело получает только поступательное движение; в противном случае тело еще и вращается.** Эта точка называется **центром массы тела.**

§ 80. Сила веса твердого тела приложена к его центру массы.—Если твердое тело падает под действием *одной только* силы тяжести, оно движется всегда поступательно. Из этого следует, что направление силы тяжести твердого тела всегда проходит через его центр массы, — как бы ни было повернуто тело (рис. 51).

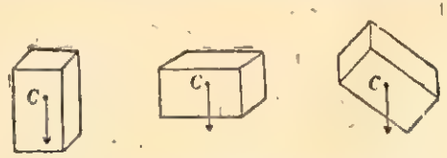

Рис. 51. Сила тяжести тела всегда приложена к его центру тяжести C.

Так как **сила тяжести всякого тела приложена к его центру массы**, то весьма часто центр массы называют **центром тяжести.**

---

[1]) Еще лучше—между доской и столом положить несколько стальных шариков.

[2]) Полезно вперед отметить на доске линию, соединяющую эту точку с точкой, где прицеплен шнурок.

§ 81. Центр тяжести подвешенного тела лежит на одной вертикали с точкой привеса.—Пусть будет M (рис. 52а) какое-нибудь тело, подвешенное на нити; C—его центр тяжести. Если центр тяжести лежит на одной вертикальной линии с нитью, то сила тяжести тела будет натягивать нить, но не будет производить никакого движения.

Рис. 52а.

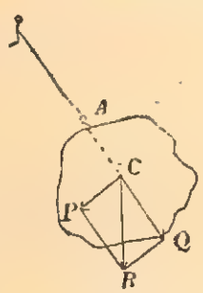

Рис. 52б.

Но если мы отклоним тело от этого положения (рис. 52б), то, разлагая силу веса CR на CP и CQ, видим, что из них только вторая уравновесится натяжением нити, а первая будет возвращать тело к прежнему положению.

§ 82. Опытное определение центра тяжести.—На предыдущем основан простой способ определения центра тяжести, удобный в особенности тогда, если тело имеет форму плоской пластинки. Пластинку подвешивают за какую-нибудь точку a (рис. 53а) и с помощью отвеса, привешенного к той же точке, прочерчивают вертикальную линию am. Потом подвешивают пластинку за другую точку b (рис. 53б) и так же прочерчивают вертикаль bn. Центр тяжести будет в точке пересечения прямых am и bn.

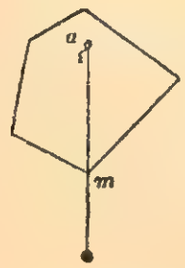

Рис. 53а.

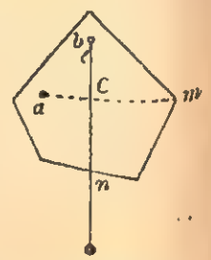

Рис. 53б.

Определение центра тяжести пластинки.

§ 83. Где находится центр тяжести различных тел?—Опытом или математическим рассуждением можно определить центр тяжести любого тела. Таким образом найдено, что:

а) центр тяжести тонкой однородной прямой палочки лежит в середине ее,

б) центр тяжести тонкой однородной пластинки, имеющей форму параллелограма, лежит на пересечении диагоналей,

в) то же самое—для однородного параллелепипеда;

г) у тонких однородных пластинок, имеющих форму правильного многоугольника, круга и кольца, центр тяжести совпадает с центром фигуры,

д) то же самое—для однородного шара;

е) центр тяжести прямого круглого цилиндра лежит на середине оси;

ж) центр тяжести однородной треугольной пластинки лежит на пересечении медиан.

Вообще центр тяжести всегда бывает ближе к тому месту, где сосредоточена наибольшая часть массы тела. Если из деревянного кружка вынуть часть и заполнить отверстие свинцом, то центр тяжести будет ближе к свинцу.

У вращающихся частей машин центр тяжести должен находиться на оси вращения, иначе при вращении машина начинает сильно трястись.—При выверке центра тяжести таких частей приделывают к ним подвижные „противовесы", чем и приводят центр тяжести в надлежащее положение.

§ 84. Виды равновесия тела, подпертого в одной точке.—Если укрепить центр тяжести тела, то оно будет в равновесии во всяком положении (**безразличное равновесие**). Пример: колесо вполне симетричного строения на своей оси.

Если точка опоры тела находится на одной вертикали с центром тяжести, *выше его* (как у отвеса, у коромысла весов или у тел, изображенных на рис. 52а и 53), то такое равновесие, будучи нарушено, восстановится само: это потому, что при отклонении тела появится составляющая сила (как P на рис. 52б), которая снова будет возвращать тело в прежнее положение. Равновесие, к которому тело возвращается само, называется **устойчивым**.

Наконец, можно представить себе еще третий случай равновесия (на практике неосуществимый), когда точка опоры лежит на одной вертикали с центром тяжести, но *ниже его* (как напр., у конуса, опирающегося на горизонтальный стол своей вершиной). Такое равновесие, если бы и было осуществимо, расстраивалось бы при малейшем отклонении тела; оно называется **неустойчивым**.

Осуществимость двух первых случаев равновесия и неосуществимость третьего легко показать с помощью прибора, изображенного на рис. 55.

§ 85. Устойчивое равновесие тел, опирающихся на горизонтальную плоскость.—Дело сложнее, когда тело опирается ниже своего центра тяжести не одной точкой или ребром, но тремя точками, не лежащими на одной прямой (как, напр., треногий штатив) или целою плоскостью—как, напр., прямоугольный ящик, наполненный однородным материалом. Пусть мы поворачиваем его около ребра A. Пока центр тяжести ящика C не перейдет через вертикальную линию CA, сила веса будет стремиться возвратить ящик в старое положение (равновесие будет устойчивым); когда центр тяжести перейдет указанную линию, сила веса уже будет стремиться положить ящик на другую сторону. См. рис. 51.

Мы видим, что здесь для устойчивости определенного положения равновесия нужно, чтобы вертикаль, проведенная через центр тяжести, проходила внутри многоугольника, полученного от соединения точек опоры.

Эти рассуждения применяются бесчисленным случаям устойчивости стен, зданий, различных сооружений, повозок, машин и вообще самых разнообразных предметов, включая человеческое тело.

§ 86. Равновесие рычага. — Так как во множестве машин и приборов имеются вращающиеся части, которые иной раз движутся, а иной раз остаются в равновесии под действием сил, то необходимо разобрать условия равновесия сил, приложенных к телу, способному поворачиваться около неподвижной оси.

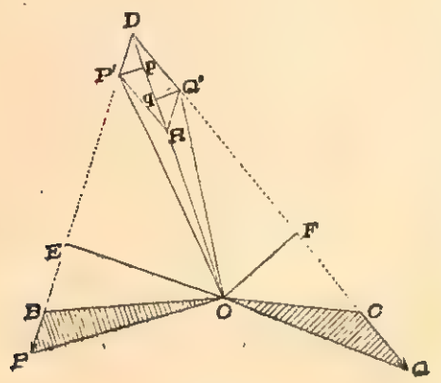

Рис. 54.

Рычаг первого рода с точкой опоры O остается в равновесии под действием сил BP и CQ.

Нужно заметить, что эти условия будут применяться не только к покою тела, но и к случаю равномерного вращения его по инерции[1]).

Положим, что O (рис. 54) есть неподвижная ось вращения тела, перпендикулярная к плоскости чертежа, и что в этой плоскости к телу приложены две силы BP и CQ. Спрашивается: при каких условиях эти две силы будут уравновешиваться?

Для того, чтобы решить этот вопрос, нам придется воспользоваться следующей механической истиной: **двигательное действие силы на твердое тело не изменится, если перенесем точку приложения силы в другое место по линии действия силы**[2]).

Перенесем точки приложения сил BP и CQ из точек B и C в точку D, где встречаются их направления. Теперь сложим

---

[1]) Большая часть наших машин во время работы имеет вращение с постоянной средней скоростью, благодаря тому, что хотя отдельные части их иногда совершают очень сложные движения, но эти движения „периодически" повторяются. С другой стороны, некоторые машины действуют ударом: накопляют кинетическую энергию в течение сравнительно длинного промежутка времени и тратят ее вдруг (как молоток при ударе). Такие машины надо рассматривать особо.

[2]) Это легко доказывается опытом при помощи доски (рис. 55), которая способна вращаться около оси O, проходящей через ее центр тяжести, и имеет несколько рядов дырочек, расположенных по вершинам квадратов со стороною *a*; в эти дырочки можно плотно вставлять легкие шпеньки. Вставив шпеньки в два отверстия, лежащие на одной линии с O, на равных расстояниях слева и справа от O, привесим к шпенькам равные грузы: доска будет в равновесии. И если мы теперь точку приложения силы веса одного из грузов перенесем по вертикальной линии ниже прежнего места, то равновесие не нарушится.

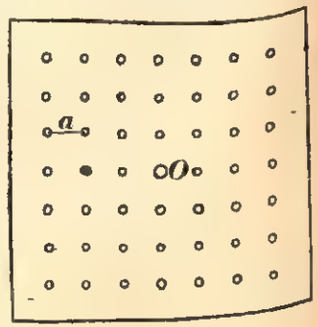

Рис. 55.

эти силы по правилу параллелограма. Если направление равнодействующей DR пройдет через неподвижную ось O, то движения не получится (силой DR тело будет только прижиматься к оси).

Мы видим, что тело, способное вращаться около неподвижной оси, остается в равновесии, когда равнодействующая приложенных к нему сил проходит через ось.

Это правило остается верным, если приложенных сил будет не две, а больше.

Тело, имеющее неподвижную ось и находящееся под действием сил, стремящихся вращать его в противоположные стороны, называется **рычагом.**

§ 87. Закон моментов. — Пользоваться предыдущим правилом на практике было бы не совсем удобно, так как сложение сил—действие не очень простое. Гораздо удобнее другое правило, называемое *законом моментов*. **Моментом**[1]) **силы относительно оси называется произведение силы на кратчайшее расстояние от силы до оси**: напр., момент силы BP есть $BP \times OE$, момент силы CQ есть $CQ \times OF$[2]). Докажем, что если равнодействующая этих сил проходит через ось, то моменты их равны. В самом деле, треугольники ODP' и ODQ', как имеющие общее основание OD и равные высоты P'p и Q'q, имеют равные площади. Далее, площадь первого из этих треугольников равна площади OBP или $\frac{1}{2}\ BP \times OE$, а площадь второго — площади OCQ или $\frac{1}{2}\ CQ \times OF$; отсюда следует $BP \times OE = CQ \times OF$, т.-е. равенство моментов данных сил. Итак, имеем **закон моментов:**

Рычаг находится в равновесии под действием двух сил, если они вращают его в противоположные стороны, и если их моменты равны.

Тот же вывод получается для случая, когда направления двух сил, вращающих рычаг в противоположные стороны, проходят не по разные стороны точки опоры, как на рис. 54, а по одну и ту же сторону ее, как на рис. 56. В первом случае мы имеем *рычаг 1-го рода*, а во втором — *рычаг 2-го рода*.

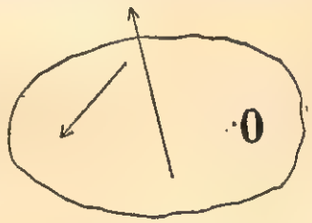

Рис. 56. Рычаг 2-го рода; O — точка опоры.

§ 88. Следствие из закона моментов. — Расстояние от силы до оси вращения называется **плечом** силы; таким образом в разобранном примере OE есть плечо силы BP, а OF — плечо силы CQ. Из доказанного равенства моментов $BP \times OE = CQ \times OF$ вытекает $BP : CQ = OF : OE$, т.-е. **при равновесии рычага, находящегося под действием двух сил, плечи обратно-пропорциональны силам.**

---

[1]) Лат. слово momentum может значить *движение, мгновение, важность*. Здесь нужно понимать слово *момент* в смысле *важности* или *двигательной способности*.

[2]) Если силы выражаются в килограммах, расстояния в метрах, то наименование моментов будет $kg^* \times m$, единица момента будет $1\ kg^* \times m$. Такая единица называется килограмметр; вместо $kg^* \times m$ пишут короче kgm.

§ 89. Случай параллельных сил. — Мы вывели закон моментов, предполагая, что направления сил, действующих на рычаг, пересекаются. Но закон этот верен и тогда, если направления сил будут параллельны. Это легко подтвердить опытом на приборе рис. 55, привешивая к двум точкам его грузы, соответственным образом подобранные.

§ 90. Лабораторная работа № 10. — *Проследить закон моментов на опыте.*

Необходимые предметы: 1) метровый масштаб, 2) надевающийся на него хомутик C с опорной призмой (рис. 57), 3) подставка f под призму, 4) грузы в 50, 100, 200 g, 5) два неизвестных груза (какие-нибудь гирьки), 6) нитки.

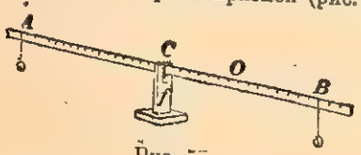

Рис. 57.

Способ выполнения. — 1) На метровый масштаб надеть хомутик с призмой так, чтобы масштаб сохранял горизонтальное положение на подставке f. Закрепить хомутик и записать положение острого ребра призмы на масштабе.

2) При помощи нитки привесить груз $P_1 = 100$ g близ одного конца масштаба. По другую сторону оси привесить груз $P_2 = 200$ g так, чтобы масштаб был в равновесии в горизонтальном положении. Сделать записи по нижеуказанной схеме. Какое соотношение получается между моментами обоих грузов?

3) Привесив по одну сторону оси вращения (в разных точках масштаба, не слишком близко к оси) два груза: $P_1 = 100$ g и $P_2 = 50$ g, уравновесить их грузом $P_3 = 200$ g, подвешенным с другой стороны. Сравнить сумму моментов сил P_1 и P_2 с моментом P_3.

4) Подвесить неизвестный груз X у конца масштаба, на расстоянии l от точки опоры, и уравновесить его известным грузом P, привешенным по другую сторону. Из закона моментов найти X. Если имеются весы, проверить найденный результат непосредственным взвешиванием.

5) К различным точкам одной стороны масштаба привесить неизвестный груз Y и известный груз P_1 и уравновесить их двумя известными грузами P_3 и P_4 на другой стороне. Пусть будет l расстояние Y от оси. Высчитать вес неизвестного груза и сравнить с результатом непосредственного взвешивания.

6) Передвинуть хомутик с призмой на 10—15 cm от средины масштаба в точку O и закрепить его здесь. Навесить известный груз P, напр., 200 g, на более короткую сторону масштаба так, чтобы масштаб был в равновесии в горизонтальном положении. Найти вес Z масштаба, предполагая, что центр тяжести его находится в том месте, где приходилось сначала острие призмы. Сравнить полученный результат с результатом непосредственного взвешивания.

Вопросы. 1) Как можно взвесить тело, не прибегая к чашкам?

2) Подтверждается ли сказанное в § 83а) относительно центра тяжести стержня?

3) Зачем, делая эти опыты, мы всегда добиваемся равновесия в *горизонтальном* положении?

Схема записи.

2) $P_1 = \ldots$; плечо этой силы $= \ldots$; момент ее $= \ldots$ } разность моментов в % = . .
$P_2 = \ldots$; плечо $= \ldots$; момент $= \ldots$

3) $P_1 = \ldots$; плечо $= \ldots$; момент $= \ldots$ } сумма $= \ldots$ } разность в % = . .
$P_2 = \ldots$; плечо $= \ldots$; момент $= \ldots$
$P_3 = \ldots$; плечо $= \ldots$; момент $= \ldots$

4) $P = \ldots$; плечо $= \ldots$; момент $= \ldots$
$l = \ldots$; отсюда $X = \ldots$; непосредственным взвешиванием: $X = \ldots$

5) $P_3 = \ldots$; плечо $= \ldots$; момент $= \ldots$ } сумма $= \ldots$
$P_4 = \ldots$; плечо $= \ldots$; момент $= \ldots$
$P_1 = \ldots$; плечо $= \ldots$; момент $= \ldots$; отсюда момент силы $Y = \ldots$;
$l = \ldots$; $Y = \ldots$; непосредственным взвешиванием $Y = \ldots$;

6) положение призмы в $C = \ldots$; новое положение в $O = \ldots$; отсюда $OC = \ldots$
$P = \ldots$; плечо $= \ldots$; момент $= \ldots$; отсюда момент силы $Z = \ldots$
отсюда $Z = \ldots$; непосредственным взвешиванием $Z = \ldots$

§ 91. Применения рычага. — Рычаг имеет многочисленнейшие применения в обыденной жизни и в технике. Рычаги 1-го рода: коромысло рычажных весов; ключ, которым отворяют замок; ключ гаечный; клещи, которыми выдергивают гвозди; бревно, которым плотники приподнимают бревенчатый дом, чтобы переменить сгнившие нижние „венцы“ бревен; ножницы или плоскогубцы, представляющие собой совокупность двух одинаковых рычагов с общей осью, и т. д. Рычаги 2-го рода: рукоятка гидравлического пресса (рис. 97); предохранительный клапан парового котла (рис. 58); щипцы для колки орехов; щипцы для углей; человеческая рука (рис. 59), и т. д. В огромном большинстве случаев рычагом пользуются для „выигрыша силы“ [1]). Если одно плечо рычага, напр., в 10 раз длиннее другого, и если на длинное плечо мы действуем силой наших мускулов, то сю мы уравновесим в 10 раз бо́льшую силу, приложенную к короткому плечу; получится выигрыш силы в 10 раз.

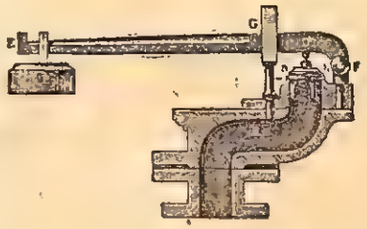

Рис. 58. Предохранительный клапан парового котла. Пар, находящийся в котле и в трубк. R, давит на пластинку ab снизу, стремясь поднять кверху рычаг EG, имеющий точку опоры в F. Напротив, груз P и вес самого рычага стремятся опустить рычаг книзу. Если давление пара делается слишком велико, то сила, создаваемая им, преодолеет; клапан ab приподнимет рычаг, и из ишек пара выйдет наружу.

---

1) Любопытное исключение представляет рука. Двуглавая мышца M (рис. 59), укрепленная одним концом в плече S, другим концом прикреплена в A к локтевой кости близ локтя E, служащего осью вращения. Если рука, напр., тянет какой-нибудь груз посредством веревки Q, то HE представляет собою рычаг 2-го рода, где преодолевающая сила Q гораздо меньше движущей силы мышцы M. Смысл такого устройства заключается в том, что точка H проходит в данное время значительно большее расстояние, чем точка A: получается *выигрыш в скорости* (а в силе—проигрыш).

Рис. 59.

Рассмотрим некоторые более сложные вопросы, решаемые по образцу вопроса о рычаге.

§ 92. Расчет равновесия поворотного крана. — Кран [1]) есть машина, служащая для подъема и горизонтального перемещения грузов. Стойка А поворотного крана (рис. 60) снабжена колесами, при помощи которых кран может поворачиваться в разные стороны на неподвижном фундаменте. Поднимаемый груз (скажем — 3000 kg) висит у верхнего конца „укосины", на канате, перекинутом через ролик и навивающемся на барабан (этот последний не изображен на рисунке, он находится внутри стойки). Если бы у крана не было противовеса, то под действием груза в 3000 kg он бы опрокинулся, поворачиваясь около колеса С. Требуется определить, как велик должен быть противовес для того, чтобы не произошло опрокидывания, если направление силы веса груза отстоит от С на 10 m, а направление силы тяжести противовеса — на 5 m.

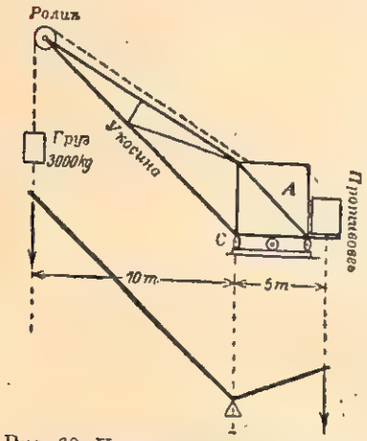

Рис. 60. Поворотный кран. Внизу — его изображение в виде схематического рычага. С служит точкой опоры.

Характер данных позволяет принять наш кран за рычаг, у которого на плечо 10 m действует сила 3000 kg*, а след., на плечо 5 m при равновесии должна действовать сила 6000 kg*.

Однако ограничить противовес этим числом было бы не осторожно. Бывали случаи, когда краны, рассчитанные без „запаса", опрокидывались. Представим себе, напр., что поднимаемая тяжесть лежит слишком далеко впереди (рис. 61). Тогда ее плечо будет уже не 10, а, напр., 12 m, и соответственно этому противовес должен составлять уже 7200 kg.

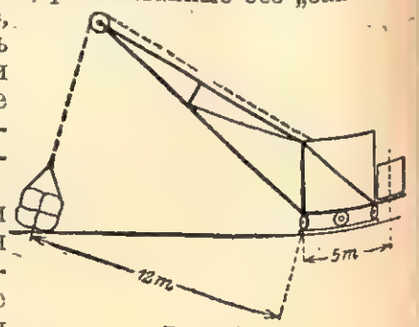

Рис. 61.

Кто-нибудь подумает, что если снять поднимаемый груз, то кран под действием противовеса опрокинется в другую сторону. Но это не так: точкой опоры рычага становится в это время уже не С, а колесо, ближайшее к противовесу; поэтому плечо противовеса, а след., и момент его, будет иметь сравнительно небольшую величину — меньшую, чем момент силы веса самого крана.

[1]) По-немецки Кран значит *журавль*.

§ 93. Колесо повозки. — Покажем, что тащить повозку по неровной дороге тем легче, чем больше диаметр колес.

Пусть колесо должно переехать через камень, как показано на рис. 62. Колесо можно рассматривать здесь, как рычаг: точкой опоры служит место соприкосновения колеса с камнем; сила тяги P с плечом h вращает колесо вперед; сила Q, зависящая от тяжести повозки и груза, имеющая плечо f, вращает колесо назад. Момент $P \times h$ должен быть по крайней мере равен данному моменту $Q \times f$. Чем больше h, тем менее может быть сила тяги P.

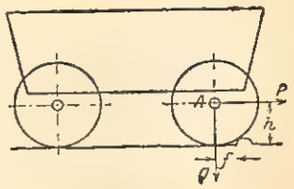

Рис. 62.

§ 94. Расчет постройки. — Положим, требуется построить деревянную башню высотою 8 m, с квадратным сечением, имеющим в стороне 2 m. Вес башни 5000 kg. Требуется рассчитать, есть ли опасность, что при сильном ветре башня будет опрокинута.

Мы будем исходить из предположения, что постройка, открытая ветру, может подвергаться при самом сильном ветре давлению в 125 kg* на каждый m² площади. Так как боковая сторона башни имеет площадь 16 m², то действующая на нее сила ветра будет $125 \times 16 = 2000$ kg*. Эта сила распределена равномерно по данной площади, а потому при расчете мы можем заменить ее силой в 2000 kg*, приложенной к центру площади (рис. 63). Если бы башня была опрокинута ветром, то она, как рычаг, вращалась бы около точки А. Изобразим ее схематически в виде рычага (рис. 64). На длиное плечо, равное 4 m, действует сила 2000 kg* и дает момент 8000 kgm; этому моменту противодействует момент силы веса башни, который мы должны высчитать. Центр тяжести башни будем считать находящимся на вертикальной линии, проходящей через середину башни, так что плечо силы ее веса будет 1 m, а момент — 5000 kgm. Мы видим, что этому моменту для равновесия не хватает 3000 kgm; башня может опрокинуться, если не укрепить ее еще как-нибудь. Обыкновенно это делается так: толстыми „анкерными" болтами башня прикрепляется к массивным камням („блокам"), служащим фундаментом: опрокидывая башню, ветер должен приподнять и эти камни. Высчитаем, какой вес должны иметь эти камни для устойчивости башни. Пусть под каждым углом башни будет по камню (рис. 63); ветер, опрокидывая башню, приподнял бы два таких камня; поэтому два камня должны давать момент в размере недостающих 3000 kgm, каждый камень должен давать 1500 kgm, и так как плечо силы веса камней равно 2 m, то вес

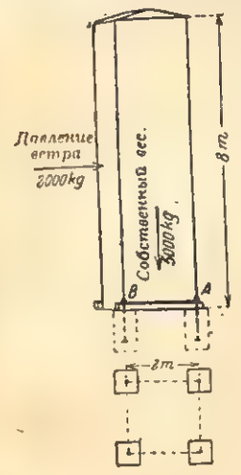

Рис. 63.

камня должен быть 1500 kgm : 2 m = 750 kg*. Зная, что 1 m³ камня весит около 1600 kg, можем определить и размеры фундаментных камней. Напр., если высота каждого камня будет 120 cm, а длина и ширина по 63 cm, то объем будет 0.47 m³, а вес 1600 × × 0.47 = 750 kg, т.-е. получится требуемое.

Рис. 64.

Теперь является новый вопрос: сможет ли грунт выдержать башню с высчитанным нами фундаментом. Площадки грунта под двумя камнями, расположенными на неподветренной стороне, должны будут выдерживать вес этих камней = = 1500 kg, затем половину веса башни, т.-е. 2500 kg, наконец, еще силу, передаваемую сюда от давления ветра. Для вычисления этой силы представим себе башню опять в виде рычага (рис. 65), имеющего точку опоры в B и передающего силу давления ветра на A. Легко видеть, что при самом сильном ветре рычаг будет развивать в A силу 4000 kg*. Итого на площадки под двумя камнями придется нагрузка в 1500 + 2500 + 4000 = 8000 kg*, а на одну такую площадку — 4000 kg*. Но поверхность каждой площадки 63² = 3969 cm²; следовательно, на каждый кв. сантиметр опорной площади придется давление круглым счетом в 1 kg*. Принимают, что хороший грунт в состоянии выдерживать давление в 2.5 kg* на 1 cm². Следовательно, в нашем случае давление на грунт отнюдь не чрезмерно.

Рис. 65.

§ 95. Ворот. Различные степени приближения теории к практике. — Простой ворот нередко употребляется для подъема ведра с водой из глубокого колодца. Над колодцем укрепляют горизонтальный вал („барабан"), могущий вращаться в углублениях своих подставок („подшипников"); на одном конце вала укрепляют концентрически большое колесо (рис. 66). Веревка, на которой висит ведро или вообще груз, навивается на вал, когда его вращает человек, хватаясь с силой P за окружность колеса. Пусть R—радиус колеса, r—радиус вала. При равновесии или при равномерном движении момент силы человека P × R должен равняться моменту тяжести груза Q × r, откуда следует P : Q = r : R или $P = \frac{r}{R} Q$, то-есть **сила движущая во столько раз меньше силы преодолеваемой, во сколько раз радиус вала меньше радиуса колеса.** Если r = 20 cm, R = 2 m, то получится выигрыш силы в 10 раз.

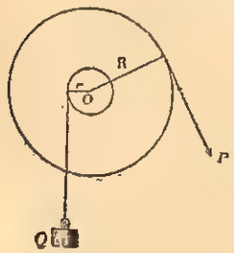

Рис. 66.

Однако такой упрощенный расчет отступает от действительности во многих отношениях. Движущей силе будет еще сопротивляться трение вала в подшипниках, вес висящей части веревки (постепенно уменьшающейся при подъеме) и „жесткость" веревки. Кроме того, веревка имеет некоторую толщину, вследствие чего радиус вала надо считать увеличенным на половину толщины веревки.

Часто говорят: „теория с практикой не сходится". Не сходится с практикой неполная, чересчур упрощенная, а потому неверная теория, как, напр., сделанный нами только-что расчет идеального ворота без трения, с невесомой, бесконечно тонкой, идеально гибкой веревкой. А полная теория, принимающая в расчет все обстоятельства, сойдется с практикой до какой угодно степени точности.

Если мы примем в расчет не все обстоятельства, а лишь наиболее важные, то мы можем получить теорию, которая будет *с большим приближением* соответствовать действительности.

Так, в случае ворота самым важным из перечисленных усложняющих обстоятельств является трение вала. Чтобы уменьшить это трение, прикрепляют к валу железные „шипы" или „цапфы" гораздо меньшего радиуса, чем вал (тогда момент силы трения будет невелик), и опирают эти шипы на хорошо сглаженные и смазанные подшипники (тогда сила трения составит всего 3—4% нагрузки). Трение будет вызываться суммою веса груза Q, веса ворота q и движущей силы P.[1]) Назвав коефициент трения буквою k, а радиус шипов буквою r_1, будем иметь равенство моментов в таком виде:

$$P \times R = Qr + k\ (Q + q + P) r_1.$$

Отсюда видно, что когда Q = 0, т.-е. груза нет, то нужна все же некоторая сила P_0, чтобы вращать ворот; а когда ворот нагружен, то к этой силе прибавляется другая, приблизительно пропорциональная грузу. Таким образом на опыте довольно аккуратно оправдывается формула $P = P_0 + nQ$, где n — постоянный коефициент. Подобное же соотношение имеет место для более сложных подъемных машин, так наз. „лебедок".

Если n и Q велики, то в последней формуле мы не сделаем большой ошибки, откинув P_0; тогда получится та же формула, как и в идеальном случае: P = nQ; n означает выигрыш силы. Итак, идеальная формула ворота тем ближе к истине, чем больше выигрыш силы, и чем больше груз.

---

[1]) Здесь для простоты расчета предлагается, что сила P действует по вертикали.

ГЛАВА VII.

Сложение параллельных сил.

§ 96. Давление на ось вращения рычага. — В § 86 мы видели, что силы, приложенные к рычагу, в случае равновесия дают равнодействующую, которая давит на ось вращения.

Легко наблюдать результаты этого давления. Пусть, напр., мы клещами вытаскиваем гвоздь из стенки (рис. 67). Точка опоры будет в O, — очень близко от точки, где приложена сила сопротивления гвоздя. Другое же плечо, на которое действует сила руки, гораздо длиннее; поэтому выигрыш силы получается очень большой, раз в 10 или еще более. Тогда, если рука давит на рукоятки клещей с силой в 12 kg*, то значит—гвоздь сопротивляется с силой в 120 kg*. Приблизительно такую же величину будет иметь и давление в точке O; поэтому иногда случается, что губы клещей крошатся, а на поверхности, на которую опираются клещи, обыкновенно получается вдавленный след.

Рис. 67.

Если точка опоры рычага „сдает", т.-е. слишком уступает давлению на нее, тогда рычаг не дает желаемого действия. Так, напр., ясно, что нельзя было бы выдернуть гвоздь, опирая клещи, вместо твердой поверхности, на мягкую подушку.

§ 97. Равнодействующая параллельных сил, направленных в одну сторону. — Свойствами рычага 1-го рода можно воспользоваться для решения такого вопроса: к твердому телу в точках A и B (рис. 68) приложены две силы P и Q, действующие по параллельным линиям в одну сторону; как велика, куда направлена и где приложена их равнодействующая?

Возьмем прибор, изображенный на рис. 57, с привешенными к нему двумя (неравными) гирьками в равновесии, и поставим его на чашку весов. На чашку будет давить своим весом подставка и рычаг, а кроме того, чашке будет передаваться равнодействующая сил тяжести обоих грузов[1]). Наложим на другую

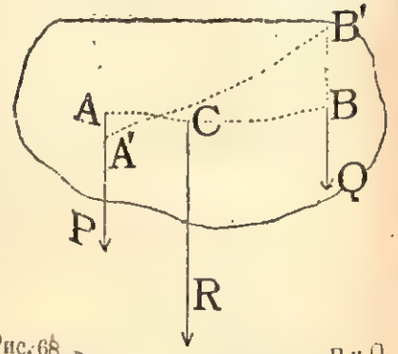

Рис. 68. Две параллельные силы P и Q, слагаясь, дают равнодействующую R.

[1]) Мы здесь пользуемся для параллельных сил правилом, которое было выведено в § 86 для сил пересекающихся. Такой прием рассуждения позволителен, так как линии параллельные могут быть рассматриваемы как частный случай линий пересекающихся (они пересекаются в бесконечности).

чашку столько гирь, чтобы весы были в равновесии, и заметим результат; затем свесим отдельно подставку с рычагом (без грузов). Разность двух результатов взвешивания даст нам величину искомой равнодействующей: и мы увидим, что эта равнодействующая *равна сумме сил тяжести обеих гирек.*

Далее очевидно, что равнодействующая *направлена в ту же сторону, куда и слагаемые силы.*

Что касается точки приложения, то мы не должны забывать, что в случае действия силы на твердое тело, точку приложения силы можно переносить по линии ее действия (§ 86). Необходимо лишь установить связь между расстояниями наших сил друг от друга (рис. 68). Но эта связь дается законом моментов: $P \times AC = Q \times CB$, или $CB : AC = P : Q$. Окончательно можем сказать:

Равнодействующая двух параллельных сил, действующих на твердое тело в одну сторону, равна их сумме и направлена в ту же сторону; она отстоит от слагаемых сил на расстояния, обратно-пропорциональные слагаемым силам[1]).

Замечание. В наших рассуждениях и в полученном результате не изменилось бы ничего, если бы точками приложения сил P и Q были не A и B, а A' и B'. Тогда было бы удобнее и точку приложения равнодействующей R взять на линии A'B'.

§ 98. Расчет потолочной балки. — На рис. 69 изображена потолочная балка фабричного здания, покоящаяся на двух стенах, отстоящих друг от друга на 8 m. На расстоянии 3 m от правой стены балка поддерживает колонну, несущую груз в 16 000 kg. Высчитаем, какое давление испытывает та и другая стена.

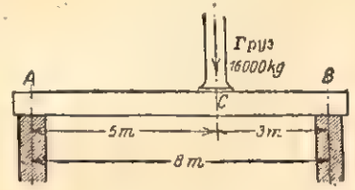

Рис. 69.

Решение вопроса сводится к *разложению* силы в 16 000 kg* на две составляющие силы A и B, при чем по правилу предыдущего $\S\ A : B = 3 : 5$. Так как $A + B = 16\,000$ kg*, то $A = 6000$ kg*, $B = 10\,000$ kg*.

Любопытно, что подобные задачи можно решать, принимая тело, на которое действуют силы, за рычаг, при чем точку опоры можно выбирать совершенно произвольно. Решим, напр., следующую задачу.

Рис. 70.

Балка, покоящаяся на двух опорах A и B, держит грузы, величина и распределение которых показаны на рис. 70; найти давления, испытываемые опорами.

[1]) Нам уже встречались случаи, когда этот закон может быть применен. Сила веса тела есть равнодействующая сил веса отдельных его частиц; на этом основании, применяя наш закон, нетрудно доказать справедливость правил § 83 относительно центра тяжести различных тел. Подобным образом легко доказывается высказанное в § 94 утверждение касательно равнодействующей давления ветра на стену постройки.

Решение. Кроме тяжести грузов, к балке приложены еще силы противодействия опор; эти силы равны и противоположны силам действия балки на опоры (след., направлены вверх). Назовем эти силы противодействия A и B. Примем балку за рычаг с точкой опоры A. Сила A проходит через точку опоры и потому не имеет ни плеча, ни момента. Сумма моментов, вращающих вправо, будет $700 \times 90 + 900 \times 170 + 1000 \times 300 = 516\,000$ kg* × cm. Влево вращает момент $B \times 240$ kg* × cm. По закону моментов $B \times 240 = 516\,000$, откуда $B = 2150$ kg*. Силу A найдем вычитанием: $A = 700 + 900 + 1000 - 2150 = 450$ kg*.

§ 99. Равнодействующая двух параллельных сил, направленных в разные стороны.— Рычаг на рис. 57 находится в равновесии под действием трех сил: сил тяжести грузов и силы противодействия подставки; эта последняя сила равна равнодействующей сил тяжести грузов, но направлена вертикально вверх.

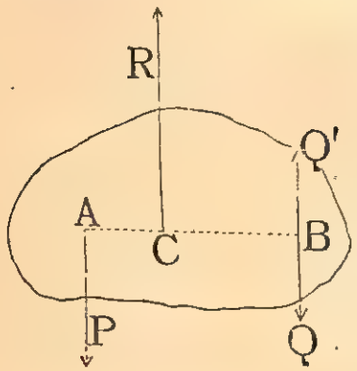

Рис. 71.

Вообще всякое твердое тело будет в равновесии под действием трех параллельных сил P, Q, R (рис. 71), если $R = P + Q$, и если $P : Q = CB : AC$.

Про каждую из сил P, Q, R можно сказать, что она уравновешивает две другие. Назовем силу Q уравновешивающею P и R; так как Q уравновешивала бы также равную и противоположную ей силу Q', то, следовательно, Q' *есть равнодействующая сил* P и R. Отсюда получается правило:

Равнодействующая двух параллельных сил, действующих на твердое тело в противоположные стороны, равна их разности и действует в сторону бо́льшей; она проходит вне слагаемых сил, ближе к бо́льшей из них: расстояния, отделяющие ее от слагаемых, обратно-пропорциональны этим слагаемым.

Замечание. Это правило неприменимо, если обе слагаемые силы P и R равны. Такие две силы называются *парою*. Пара не имеет равнодействующей (т. е. не может быть заменена одной силой). Она вращает тело, на которое действует.

§ 100. Лабораторная работа № 11. *Проследить на опыте законы равнодействующей параллельных сил.*

Необходимые предметы: 1) два пружинных безмена, 2) метровый масштаб, 3) довольно тяжелая гиря, 4) 3 шнурка.

Способ выполнения. 1) Свесить гирю.

2) Подвесить безмены на гвоздях, вбитых в стену, или на штативах, на расстоянии примерно 80 cm друг от друга. К ним, при помощи шнурков, привесить симетрично метровый масштаб, как показано на рис. 72.

3) Отсчитать показания обоих безменов, когда к ним привешен один только масштаб.

4) Посредине отрезка масштаба, ограничиваемого шнурками, привесить гирю W.

5) Отсчитать показания безменов; разности между этими показаниями и показаниями, когда привешен один масштаб, назвать F_1 и F_2.

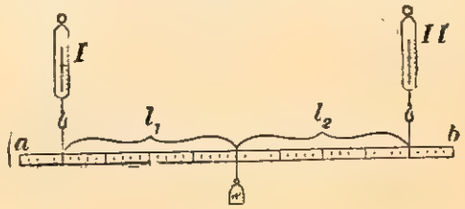

Рис. 72.

6) Подвешивать гирю так, чтобы расстояние от удерживающего ее шнура до шнуров, прицепленных к безменам, относились как 5:3, 6:2, 7:1. Каждый раз поступать, как указано под № 5. Расстояния от среднего шнура до крайних называть l_1 и l_2.

7) Высчитать и записать сумму $F_1 + F_2$.

8) Высчитать и записать произведения $F \times l_1$ и $F_2 \times l_2$.

9) Какова равнодействующая сил F_1 и F_2?

10) Высчитать и записать разность $W - F_1$.

11) Высчитать и записать произведения $F_1 \times (l_1 + l_2)$ и $W \times l_2$.

12) Какова равнодействующая сил F_1 и W?

Схема записи.

Вес гири W = . . . g.
Начальный отсчет безменов (с одним масштабом): I) . . . . g; II) . . . . g.

$l_1 : l_2$	Безм. I	Безм. II	F_1	F_2	l_1	l_2	F_1+F_2	$F_1 \times l_1$	$F_2 \times l_2$	$W-F_1$	$F_1 \times (l_1+l_2)$	$W \times l_2$
1:1												
5:3												
6:2												
7:1												

ГЛАВА VIII.

О работе и энергии.

§ 101. Определение работы.—Когда какая-нибудь механическая сила двигает тело, к которому она приложена, то говорят, что она совершает механическую работу (или просто работу).

Совершонную работу условились измерять произведением движущей силы на путь, пройденный по направлению этой силы[1]).

Если лошадь, делая усилие в 40 kg*, везет повозку на протяжении 1000 m, то совершонная ею работа измеряется произведением 40 kg*$\times$1000 m = 40 000 kg*$\times$ m.

Если человек, достающий воду из колодца при помощи ворота, действует на окружность колеса с силой 6 kg*, и если диаметр колеса — 1.1 m, то при каждом обороте ворота человек совершает работу, равную 6 kg*$\times$3.14$\times$1.1 m = 20.7 kg*$\times$ m.

Если при волочении проволоки через „глазок" волочильной доски (рис. 1) требуется сила в 70 kg*, то на каждый метр вытянутой проволоки придется совершить работу 70 kg*$\times$1 m = = 70 kg*$\times$ m.

§ 102. Единица работы.—В примерах предыдущего § работа выражается в особых единицах, наименование которых записано знаком kg*$\times$ m.

Такую единицу работы называют **килограмметр** и сокращенно обозначают kgm. Очевидно, что **килограмметр есть работа силы в 1 килограмм на пути в 1 метр.**

Если за единицу силы принимается дин $\left(\frac{g \times cm}{sec^2}\right)$, а за единицу длины — сантиметр, то соответствующая единица работы будет $1\ \frac{g \times cm}{sec^2} \times 1\ cm = 1\ \frac{g \times cm^2}{sec^2}$. Такая единица работы называется **динсантиметр** или **эрг**[2]).

Эрг — очень мелкая единица; поэтому чаще употребляется другая, более крупная единица работы, называемая **джоуль** (J) и равная **10 миллионам** (10^7) **эргов.**

Тысяча джоулей называется **килоджоуль** (kJ). Нетрудно сообразить, что килоджоуль равняется работе одного стэна (см. § 73) на пути в 1 метр.

Задача. Найти соотношение между килограмметром и килоджоулем.

---

[1]) Это определение работы согласуется с житейским представлением о полезной физической работе. Согласно данному здесь определению, работа пропорциональна двум величинам: силе и пути. И в самом деле, если человек поднимет во второй этаж две вязанки дров, то он (в житейском смысле) совершит работу вдвое большую, чем тогда, когда он приносит одну вязанку; а если он поднимает ношу на высоту третьего этажа, то всякий скажет, что эта работа вдвое больше, чем в случае подъятия той же ноши на высоту второго этажа.

[2]) От греч. érgon = *работа*.

Реш. 1 kgm = 1 kg* $\times$ 1 m = 0.001 t $\times$ 9.8 $\frac{m}{sec^2}$ $\times$ 1 m =

= 0.0098 $\frac{t \times m}{sec^2}$ $\times$ 1 m = 0.0098 sn $\times$ 1 m = 0.0098 kJ = почти 0.01 kJ.

Итак, **килоджоуль = приблизительно 100 килограмметрам.**

§ 103. Вычисление работы, когда направление силы не совпадает с направлением передвижения.—Работа силы выражается произведением ее и пройденного пути лишь в том случае, если сила направлена как-раз вдоль проходимого пути.

Так бывает далеко не всегда. Может случиться, что проходимый путь образует прямой угол с направлением силы. Тогда *по направлению силы не проходится никакого пути*, и *работа силы поэтому будет равна нулю*. Представим себе, напр., человека с ношей на спине; если бы ноша, в то время как человек идет, двигалась строго по горизонтальной линии, то мускульная сила человека, поддерживающая ношу, вовсе не совершала бы работы.

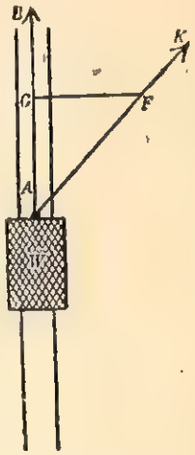

Рис. 73.

Если сила образует какой-нибудь угол с направлением движения, то для вычисления работы можно разложить силу на две составляющие: одну—по направлению движения, другую—перпендикулярно к нему. Первую составляющую нужно помножить на пройденный путь; вторая — не дает никакой работы.

Так, если лошадь тянет вагонетку W по рельсам при помощи веревки AK, идя сбоку пути (рис. 73), то для вычисления работы, совершаемой лошадью, мы можем разложить усилие лошади (пусть оно графически изображается линией AF) на две силы: AG по направлению пути, GF — перпендикулярно к пути; а затем достаточно силу AG помножить на путь. Сила же GF не совершает никакой работы.

§ 104. Энергия. — Если человек производит механическую работу (напр., вращает рукоятку лебедки) в течение длинного рабочего дня, он чувствует, как постепенно уменьшается его „работоспособность", как оскудевает присущий его телу запас „возможной работы". Работа, выделенная человеком, передалась лебедке или вообще тому телу, к которому он прилагал свою силу.

Наоборот, после отдыха и принятия пищи человек чувствует, что запас „возможной работы" в нем восстановился. Этот запас восстановился на счет затраченных пищевых веществ.

Если работает не человек, не животное, а машина, то для этого опять-таки необходима некоторая трата чего-то. Для работы паровой машины необходимо затрачивать топливо; для работы электродвигателя — „электрическую энергию", которая меряется в „эктоуатчасах" или „килоуатчасах", и за которую приходится каждый месяц платить по счету. Было много попыток построить „машину вечного движения" (по-латыни perpétuum mobile), кото-

рая работала бы, ничего не тратя: однако все такие попытки заканчивались полнейшим неуспехом. Работу нельзя создать из ничего, точно так же, как нельзя создать из ничего материю. С другой стороны, внимательное наблюдение явлений природы показывает, что работу нельзя и обратить в ничто, или уничтожить бесследно (как нельзя уничтожить материю).

Существует мировой запас материи, который постоянно перераспределяется, подвергается изменениям физического состояния, химическим превращениям, но общее количество материи при этих превращениях остается неизменным. Невозможность создания или уничтожения материи составляет сущность „закона сохранения материи".

Подобно этому, **невозможность создания работы из ничего или бесследного уничтожения ее** составляет сущность **закона сохранения энергии:**

Энергией называют тот особый мировой запас, который проявляется в совершении работы. Если мы говорим, что какая-нибудь сила совершила T килограмметров работы, то это значит, что тело, развивавшее эту силу, передало *T килограмметров энергии* другому телу, к которому была приложена его сила.

Таким образом, можно сказать: **работа есть мера передачи или превращенной энергии.** Наблюдая за совершаемой работой, мы тем самым составляем себе понятие о происходящих в природе или в технике передачах и превращениях энергии.

Уже из того, что за „энергию" приходится платить деньги, ясно, насколько важно уметь учесть энергию и меру ее—работу.

Из сказанного понятно, что единицами энергии будут служить единицы работы.

§ 105. Подсчет энергии для идеального ворота. — Физика началась примерно $2^1/_2$ тысячи лет тому назад, но только в XV веке (в писаниях знаменитого ученого и художника Леонардо да-Винчи) мы встречаем первый проблеск идеи о сохранении энергии; а окончательно и в полной форме был установлен этот закон менее, чем сто лет тому назад. Эта медленность показывает, что развитие и усвоение идеи сохранения энергии—дело не легкое.

Мы можем сколько-нибудь ясно понять закон сохранения энергии не иначе, как посредством внимательного подсчета работы в разных частных случаях. Сделаем такой подсчет для ворота, предполагая сначала, ради простоты, что вес веревки и ее толщина ничтожны, и что нет ни трения, ни других „вредных сопротивлений". Движение ворота, как всегда, будем предполагать равномерным—для того, чтобы соотношение сил на нем было такое же, как при равновесии.

Во время одного оборота движущая сила P (рис. 66) совершает работу $T_1 = P \times 2\pi R$. Это значит, что двигатель, развивающий эту силу (напр., человек), отдал вороту количество энергии, равное $P \times 2\pi R$.

За время одного оборота ворота груз Q поднимается на высоту $2\pi r$. Если бы это поднятие производилось просто силою рук

(притом равномерно), то нужно было бы, напрягая мускулы с силой Q, совершить работу $T_2 = Q \times 2\pi r$, т.-е. затратить выражаемое этой формулой количество энергии. Но из теории ворота (§ 95) мы знаем, что $PR = Qr$; поэтому $T_1 = T_2$. Мы видим, что для равномерного поднятия груза на данную высоту приходится затратить одно и то же количество энергии, будем ли мы поднимать этот груз непосредственной тягой за веревку или посредством ворота. Это показывает, что **машина не дает нам никакого выигрыша энергии:** она дает лишь выигрыш силы (но этот выигрыш сопровождается соответствующим ему проигрышем пройденного пути: во сколько раз P меньше Q, во столько раз $2\pi r$ меньше $2\pi R$).

Решим еще такой вопрос. Куда девается энергия, затраченная при поднятии груза и переданная вороту? Мы только что видели, что для поднятия груза Q на высоту h требуется затратить количество энергии, равное Qh. Ответ может быть дан только в такой форме: это количество передано воротом грузу Q; **приподнятый груз обладает запасом энергии,** и его энергия как-раз меряется произведением Qh из силы тяжести груза на высоту поднятия.

Эта энергия, присущая приподнятому грузу, называется **потенциальной энергией тяжести.**

Что касается машины, то мы видели, что при поставленных нами идеальных условиях, она не задерживает в себе никакой доли энергии: что воспринимается ею на одном конце, то полностью отдается на другом конце.

Задача. Баба, служащая для забивки свай, весит 8000 kg. Ее при помощи парового „копра" поднимают на высоту 3 m. Найти получаемый ею запас потенциальной энергии.

Реш. 8000 kg* $\times$ 3 m = 24 000 kgm.

Предоставляем читателю самому доказать, что в случае наклонной плоскости (рис. 48) работа силы, поднимающей тело вдоль пути AB, равна потенциальной энергии тяжести тела, поднятого на высоту CB, и что в случае рычага энергия, получаемая им, равна энергии, которую он отдает.

§ 106. Реальные соотношения. Коефициент полезного действия.—В действительных машинах всегда имеется трение и другие вредные сопротивления. Вредные сопротивления, как говорится, „поглощают" некоторую долю той энергии, которая сообщается машине; эта доля превращается главным образом в теплоту, которая представляет особую форму энергии. Эта теплота в данном случае совершенно *бесполезна*. Что касается того количества энергии, которым человек может *воспользоваться* от машины, и получение которого составляет цель машины, то оно, в силу сказанного, будет всегда *меньше* количества энергии, полученного машиною. Поэтому отношение

$$\frac{\text{полезная энергия, получаемая от машины}}{\text{энергия, сообщенная машине}}$$

в действительности всегда будет меньше единицы. Это отношение называется **коефициентом полезного действия** машины.

Если, напр., в случае ворота движущая сила совершает 55 kgm работы в то время, как ворот поднимает 25 kg воды на 2 m, то коефициент полезного действия ворота будет $\frac{50}{55}=\frac{10}{11}$ или 91%. В этом случае 9% работы движущей силы поглощаются вредными сопротивлениями.

§ 107. Лабораторная работа № 12. — *Проследить закон сохранения энергии на наклонной плоскости. Определить полезное действие последней.*

Необходимые предметы: 1) доска с блоком на одном конце и с приспособлением для закрепления на штативе посредине (рис. 74); 2) штатив; 3) тележка; 4) нить; 5) гирька для привешивания к нити; 6) разновески для накладывания в тележку; 7) весы; 8) метровый масштаб.

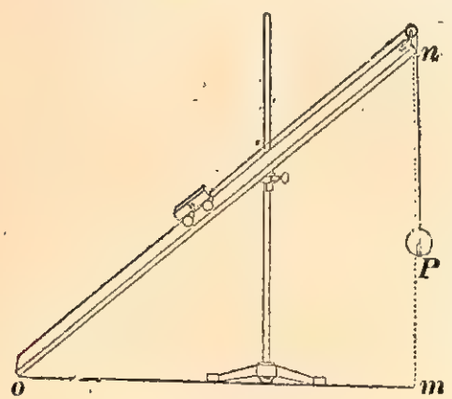

Рис. 74.

Способ выполнения. 1) Найти вес Q тележки.

2) Сделать установку, как показано на рис. 74. Угол *nom* пусть будет около 45°. К свешивающемуся концу нити привесить такую нагрузку P, чтобы тележка без остановок двигалась кверху по наклонной плоскости.

3) Наложить в тележку такое количество разновесок, чтобы при легких постукиваниях на доске тележка медленно и равномерно двигалась вниз. Записать вес q_1 наложенных разновесок.

4) Убавить количество разновесок в тележке настолько, чтобы при таких постукиваниях тележка так же двигалась вверх. Записать вес q_2 разновесок. С какой силой натянута нить, прицепленная к тележке? Чем объясняется неодинаковость нагрузки q_1 и q_2?

5) Вычислить среднее W из величин $Q+q_1$ и $Q+q_2$ и принять это среднее за вес того груза, который могла бы равномерно поднимать по наклонной плоскости сила P, если бы не было трения.

6) Тщательно измерить высоту $mn=h$ и длину $on=l$ наклонной плоскости.

7) Поставив наклонную плоскость под углом 30° к горизонту, повторить все опыты 2—6.

8) Выразить словами и алгебраической формулой закон сохранения энергии для случая поднятия груза по наклонной плоскости без трения.

9) Найти коефициент полезного действия данной плоскости (при наличности трения) по формуле $\eta=\frac{(Q+q_2)h}{Pl}$, для обоих рядов произведенных опытов.

Схема записи.

I. Закон сохранения энергии.

№ опыта	Q	q_1	q_2	W	h	P	l	Pl	Wh	Разность в %
1										
2										

II. Полезное действие.

№ опыта	Приход энергии $(Q+q_2)h$	Расход энергии Pl	η
1			
2			

Вопросы. 1) Железнодорожный вагон весом в 15 t при помощи каната, приводимого в движение лебедкой, втаскивается на наклонный помост, длиною в 100 m и с подъемом в 12 m. Требуется вычислить силу, действующую в канате.

2) Две лошади втаскивают груженую повозку, весом 1200 kg, по дороге с уклоном 5%. Если каждая лошадь развивает силу тяги в 50 kg*, то как велик коефициент полезного действия?

3) Какие причины уменьшают коефициент полезного действия в произведенном опыте?

§ 108. Применение закона сохранения энергии к решению задач. Работа поднятия груза. — Закон сохранения энергии позволяет весьма просто решать множество важных задач.

Возьмем, например, такую задачу: человек поднимает руками груз в P kg на h m. Какую работу совершит он, преодолевая силу тяжести этого груза?

Эту задачу мы не можем решить непосредственно на основании определения работы, потому что усилие, которое здесь делает человек, изменяется[1]); и мы ничего не знаем о том, как

[1]) Когда человек начинает поднимать покоящийся груз, он должен не только уравновесить силу тяжести груза, но еще сообщить ему некоторое ускорение. Поэтому здесь прилагаемая сила будет превышать силу веса груза. Наоборот, когда перед остановкой груза начинается период замедленного движения, то прилагаемая сила будет меньше тяжести груза.

именно оно изменяется. На основании же закона сохранения энергии задача решается крайне просто. Рассуждаем так: после того, как груз поднят, его потенциальная энергия оказывается увеличившейся на Ph kgm; и так как в явлении, кроме груза, участвовал только человек, то энергия человека должна была уменьшиться на Ph kgm. Но совершаемая человеком работа равна энергии, им затраченной: итак, искомая работа = Ph kgm.

§ 109. Машины, устройство которых неизвестно. — Можно решать вопросы относительно машин, не зная в деталях их устройства. Пусть, напр., имеется машина, с одного конца приводимая в движение вращением „кривошипа", а на другом конце поднимающая подвешенный груз. Положим, груз весит 250 kg и поднимается в секунду на 4 cm; машина сделана с таким расчетом, чтобы рукоятка кривошипа проходила в секунду 0.8 m (это соответствует условиям нормальной работы человека); спрашивается, сможет ли один человек приводить в движение эту машину?

Машина выделяет в секунду $250 \times 4 = 1000$ kg* × cm = = 10 kgm энергии. Значит, при отсутствии вредных сопротивлений, она должна столько же поглощать. Если сила, с которою рабочий должен нажимать на рукоятку, будет x kg*, то в секунду машина будет получать $x \times 0.8$ kgm, и мы имеем уравнение $0.8\,x = 10$, откуда $x = 12.5$ kg*. Существование вредных сопротивлений заставит несколько увеличить эту цифру; но так как при длительной работе величина давления рабочего на рукоятку кривошипа может составлять до 15 kg*, то мы видим, что на поставленный вопрос можно ответить утвердительно.

§ 110. Расчет клина. — Пусть вертикальный стержень (рис. 75), могущий скользить в направляющей трубке, своим верхним концом поддерживает груз; нижний конец снабжен роликом и упирается в наклонную плоскость клина, лежащего на катках. Рабочий толкает клин и таким образом поднимает груз.

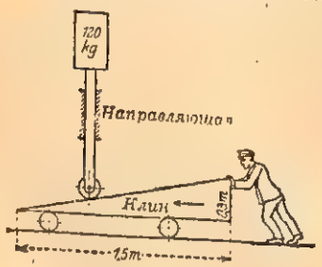

Рис. 75.

Если груз весит 120 kg, если размеры клина — 1.5 m по горизонтальному направлению и 0.3 по вертикальному, то какое усилие должен делать рабочий при отсутствии вредных сопротивлений?

Продвинув вперед весь клин, рабочий поднимет груз на 0.3 m и, след., произведет работу $120 \times 0.3 = 36$ kgm. Так как путь, пройденный рабочим, равен 1.5 m, то развиваемая им сила есть 36 kgm : 1.5 m = 24 kg*.

§ 111. Расчет винта. — Представим себе клинообразную пластинку, свернутую в виде цилиндра и дающую один винтовой ход (рис. 76). Вращая ее вокруг оси цилиндра, можно будет

поднимать груз (на рис. 76 такое вращение происходит благодаря тому, что винт прикреплен к концентрическому диску, охватываемому шнурком, который перекинут через ролик и натягивается грузом P). Если шаг винта — 15 cm, диаметр диска — 50 cm, и вес груза — 200 kg, то как велик должен быть груз P при равномерном движении машины и при отсутствии вредных сопротивлений?

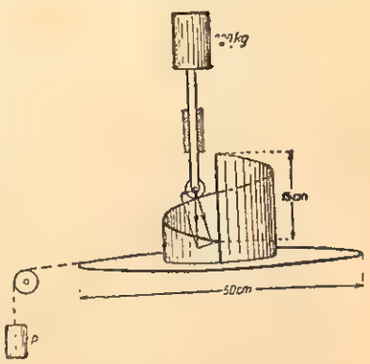

Рис. 76.

При одном обороте диска груз в 200 kg будет поднят на 15 cm, след., будет выделено $200 \times 0.15 = 30$ kgm потенциальной энергии. Сколько же потенциальной энергии должен потерять груз P; так как при одном обороте диска он опускается на $3.14 \times 50 = 157$ cm, то отсюда $P = 30$ kgm : 1.57 m = 19.1 kg* [1]).

Любопытно отметить, что при этом расчете не играет роли *диаметр винта*, а только — шаг винта и диаметр диска.

§ 112. Домкрат и другие применения винта. — Практическое осуществление разобранной схемы представляет **винтовой домкрат** [2]) (рис. 77). Винт его снабжен квадратной нарезкой (рис. 78); гайка находится вверху чугунного пустотелого конуса; для вращения служит рукоятка. Конус имеет внизу выдающиеся ножки, которые врезываются в пол; таким образом, гайка не будет в состоянии поворачиваться. Наверху винта находится „головка", легко вращающаяся около его оси; на нее опирается груз. Подобные домкраты употребляются при уходе за автомобилями, также при сборке машин (для поднимания и поддерживания тяжелых частей).

Рис. 77.

Рис. 78.

Трение здесь велико, и вследствие этого простой расчет, сделанный нами выше, очень уклоняется от истины. Вот пример: шаг винта домкрата был 1 cm, расстояние от оси вращения до точки приложения движущей силы (плечо) 50 cm. Без трения выигрыш силы был бы в 314 раз. На самом же деле оказалось, что без всякой нагрузки для вращения винта нужно было прикладывать к тому же плечу силу 1.8 kg*, а при нагрузке 1000 kg* требовалась сила 18 kg*. Подобно как для ворота (§ 95), можно и для

---

[1]) Предоставляем читателю доказать, что при отсутствии вредных сопротивлений сила P, вращающая винт, во столько раз меньше производимого винтом давления Q вдоль оси, во сколько раз шаг винта h меньше окружности, описываемой точкою приложения силы P.

[2]) От немецкого Daumkraft.

винта принять „линейную“ зависимость между движущей силой P и преодолеваемой Q, т.-е. $P = P_0 + nQ$. Поэтому для рассматриваемой машины будет $P_0 = 1.8$ kg*, $n = \frac{P - P_0}{Q} = \frac{13 - 1.8}{1000} = \frac{1}{90}$, следовательно $P = 1.8 + \frac{Q}{90}$ kg*. При $Q = 1000$ kg* выигрыш силы получается всего в $1000 : 13 = 77$ раз. Таким образом при этой нагрузке коефициент полезного действия $\eta = 77 : 314 =$ едва только 25%.

Так как винт допускает очень большой выигрыш силы, его употребляют еще в прессах.

Одно из замечательных применений имеет винт, под именем *гребного винта* и *воздушного винта* (*пропелера*), к движению судов в воде и к воздухоплаванию. В обоих этих случаях винт выполняет одинаковую задачу: опираясь своей винтовой поверхностью о воду или о воздух, развить вдоль своей оси силу, необходимую для перемещения судна или воздухоплавательного апарата.

§ 113. Дрель. Применение винта к скреплению частей. — Во всех указанных выше случаях винт служит для преобразования вращательного движения в поступательное. Изредка встречается обратный случай, который легко пояснить из рис. 76: представим себе, что тяжесть груза $Q = 200$ kg*, давящего на винтовую нарезку, является силой движущей, а сила P по окружности диска — силой преодолеваемой (при чем окружность диска может и совпадать с окружностью винта и даже быть меньше). Так устроена *дрель* — прибор для сверления дырок (рис. 79). Чтобы придать винту дрели быстрое вращение, надо надавливать на гайку A вдоль оси.

Рис. 79.

Если шаг винта мал по сравнению с его диаметром, т.-е. винтовая линия имеет слабый наклон, тогда никакое давление вдоль оси винта не может заставить его повернуться: этому мешает трение (точно так на пологой наклонной плоскости груз сам не скользит вниз, как бы мы на него ни давили сверху). На этом основано применение винтов с небольшим шагом для прочного скрепления частей построек и машин.

§ 114. Зубчатые колеса. Лебедка. — Пару зубчатых колес, сцепляющихся своими зубцами (рис. 80), можно рассматривать как систему двух рычагов, из которых один приводит в действие другой. Если то из зубчатых колес, к которому прилагается движущая сила, снабдить кривошипом (для увеличения момента силы), а к другому приделать концентрический барабан, на который наматывается веревка (как у ворота), то получится простая **зубчатая лебедка** (рис. 80, 81). Сделаем расчет ее действия (без трения) двумя способами.

I. *На основании закона моментов:* человек, надавливающий рукой на рукоятку кривошипа, пусть развивает силу 15 kg*.

При длине кривошипа 35 cm это дает момент $15 \times 35 = 525$ kg* × cm. Если радиус малого зубчатого колеса („шестерни“), который здесь служит коротким плечом рычага, равен 5 cm, то на зубцах развивается сила давления $Z = 525 : 5 = 105$ kg*. Далее эта сила действует на большую зубчатку с радиусом (плечом) в 20 cm, так что получается момент $105 \times 20 = 2100$ kg* × cm; ту же величину должен иметь при равновесии или равномерном движении момент груза; если радиус барабана 7 cm, то поднимаемый лебедкою груз составит $2100 : 7 = 300$ kg.

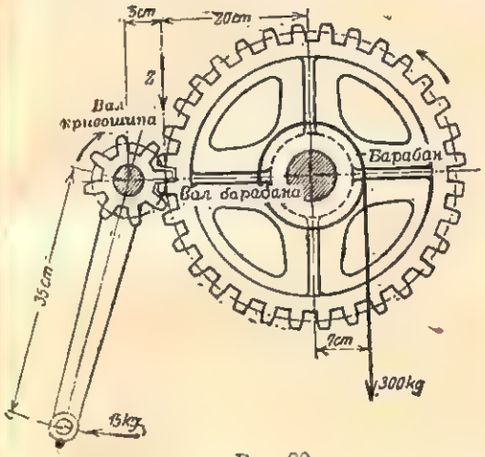

Рис. 80.

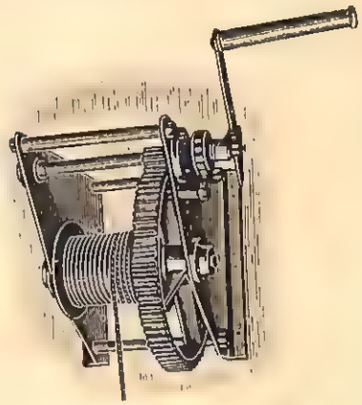
Рис. 81.

II. *На основании закона сохранения энергии:* считая вес груза неизвестным и означая его (в килограммах) Q, получим для потенциальной энергии, передаваемой грузу за время одного оборота барабана, выражение $Q \times 2\pi \times 7$ kg* × cm. Так как отношение окружностей обоих колес (или, все равно, отношение чисел зубцов) равно 5 : 20 или 1 : 4, то малое колесо с кривошипом сделает 4 оборота в то время, пока большое с барабаном сделает один оборот; за четыре оборота кривошипа машина возьмет на рукоятке энергию $4 \times 15 \times 2\pi \times 35$ kg* × cm; по закону сохранения энергии должно существовать равенство $Q \times 2\pi \times 7 = 4 \times 15 \times 2\pi \times 35$, откуда $Q = 300$ kg.

Очень важно знать, насколько быстро лебедка может поднимать грузы. Напр., если приходится поднимать мешки в высокий амбар, то необходимо рассчитать, сколько времени требуется для этого, так как отсюда определяется число необходимых лебедок. Нормально работающий человек может вращать рукоятку кривошипа со скоростью около 80 $\frac{cm}{sec}$. Если он (как мы предполагали) нажимает на рукоятку с силой 15 kg*, то в секунду он производит работу 15 kg* $\times 80$ cm $= 1200$ kg* × cm. Эта работа превращается в потенциальную энергию груза, равного 300 kg; поэтому груз поднимается в секунду на 1200 kg* × cm : 300 kg* $= 4$ cm.

Мы до сих пор не принимали в расчет трения в подшипниках вала кривошипа и вала барабана, трения между зубьями колес и жесткости каната. Опыты показали, что при хорошо устроенной лебедке на преодоление этих сопротивлений тратится примерно 15% работы двигателя, так что полезное действие лебедки будет около 85%. Поэтому, если человек не может развивать большей силы, чем предположенные нами 15 kg*, то поднимаемый груз составит только $0.85 \times 300 = 225$ kg. Если же во что бы то ни стало нужно подвешивать к лебедке груз в 300 kg, то придется пожертвовать 15% скорости, так что груз будет проходить только $0.85 \times 4 = 3.4$ cm в секунду. Для этого, конечно, придется дать плечам рычагов иное соотношение, чем на рис. 80.

§ 115. Понятие о мощности машин. — В рассмотренной нами ручной лебедке „полезная работа" *в секунду* составляла 0.85×1200 kg* $\times$ cm $= 10$ kgm (круглым счетом). Представим себе гораздо более *мощную* „механическую" лебедку (рис. 82), входящую в состав угольного разгрузочного крана и приводимую в движение электромотором, паровой машиной или бензиновым двигателем. Пусть при каждом ходе крана нужно поднимать 1300 kg угля, да кроме того вагонетка весит 450 kg, так что в общем кран должен поднимать 1750 kg. Положим, что высота подъема — 10 m; а чтобы кран переносил достаточное количество угля и разгружал пароход достаточно быстро, груз должен проходить это расстояние в полминуты. Тогда полезная работа *в секунду* выразится так: $\frac{1750 \text{ kg}^* \times 10 \text{ m}}{30 \text{ sec}} = 580 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$ (приблизительно).

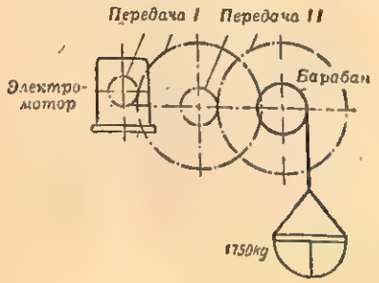

Рис. 82.

Что касается мотора, служащего для лебедки источником энергии, то его затрата *в секунду* должна быть значительно больше, чем 580 kgm, в виду наличности вредных сопротивлений. Положим, что мотор дает n $\frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$, что при передаче энергии от мотора к первой паре зубчатых колес теряется 10% (так что доходит только $0.9\,\text{n} \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$), что при передаче от первой пары ко второй паре колес тратится еще 10% (на барабан передается $0.9 \times 0.9\,\text{n} \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$); наконец, что сопротивления барабана и ролика поглощают бесполезно 13% оставшегося количества; тогда для подъема груза остается только $0.87 \times 0.9 \times 0.9\,\text{n} = 0.705\,\text{n} \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$.

Это, по нашим условиям, должно равняться $580 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$, откуда $\text{n} = 823 \left(\frac{\text{kgm}}{\text{sec}}\right)$.

§ 116. Мощность и меры ее. — Мы встретились, таким образом, с новой величиной, которая выражает **работу машины в секунду.** Эта величина называется **мощностью** машины. Мера, которою мы только что пользовались для числового выражения мощности, — один килограмметр в секунду или $\frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$, чересчур мелка для практических целей. Гораздо чаще в технике употребляется другая, более крупная единица мощности, равная $75 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$ и носящая очень неподходящее, но укоренившееся название **лошадиной силы** (сокращенное означение HP) [1]).

Мотор, действие которого мы только-что рассматривали, должен иметь мощность $823 : 75 = 11$ лошадиных сил. А мощность рабочего в § 114 была только $15 \text{ kg}^* \times 0.8 \frac{\text{m}}{\text{sec}} = 12 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}} = \frac{12}{75}$ HP, или немного меньше, чем $^1/_6$ лошадиной силы.

Употребляется часто единица мощности, равная **одному джоулю в секунду** или $1 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$. Эта единица называется **уат** [2]) (W). Сто уатов называются **эктоуат**; это — мощность, дающая 100 джоулей в секунду. Тысяча уатов наз. **килоуат** (kW); это — мощность, дающая килоджоуль в секунду.

Так как мощность получается делением работы на время, то очевидно, что, умножив мощность на время, получим работу. Напр., от умножения 1 эктоуата на 1 час, или $100 \frac{\text{J}}{\text{sec}} \times 3600$ sec, получается 360 000 джоулей. Это количество нередко принимается за единицу работы или энергии и называется **эктоуатчас.** 10 эктоуатчасов составляют **килоуатчас.**

Выведем еще соотношение между лошадиной силой и килоуатом. 1 лош. сила или $1 \text{ HP} = 75 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}} = \frac{75 \times 1 \text{ kg}^* \times 1 \text{ m}}{1 \text{ sec}} = 75 \times 1000 \text{ g} \times 980 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2} \times 100 \text{ cm} : 1 \text{ sec}$ (потому что сила в 1 kg* равна массе 1000 g, умноженной на ускорение тяжести $980 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$) $= 736 \times 10^7 \frac{\text{g} \times \text{cm}^2}{\text{sec}^2 \times \text{sec}} = 736 \frac{\text{J}}{\text{sec}} = 736$ W = (при-

[1]) Начальные буквы слов английского выражения Horse-Power (= лошадиная мощность).

[2]) Уат (Watt) — фамилия знаменитого английского инженера и физика XVIII века; Уат своими усовершенствованиями паровой машины увеличил полезное действие ее в три раза и тем придал ей то значение, какое она возымела в технике XIX века.

близительно) $^3/_4$ килоуата. Наоборот, 1 kW = приблизительно $1^1/_3$ лошадиной силы.

§ 117. Лабораторная работа № 13. — *Исследовать применение блоков для изменения направления силы, для выигрыша силы и для выигрыша скорости.*

Необходимые предметы: 1) блоки и системы блоков, подобные показанным на рисунке 83; 2) пружинный безмен; 3) груз, привешиваемый к блокам; 4) гирьки весом 100 или 200 g.

Способ выполнения. I. **Неподвижный блок.** 1) Если вес груза неизвестен, свесить его. Определить также вес безмена.

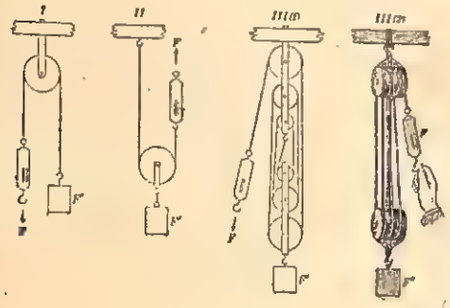

Рис. 83.

2) Прицепить груз и безмен к нити неподвижного блока, как показано на рис. 83, I.

3) Медленно и равномерно тянуть *вниз* за крючок безмена и в это время отсчитать его показание. Прибавив к этому показанию тяжесть самого безмена, получим силу F_1. Подобно этому определить силу F_2 при движении безмена *вверх*. Среднее из F_1 и F_2 даст величину движущей силы при отсутствии вредных сопротивлений. Назвать это среднее F.

4) Как велик путь, на протяжении которого должна работать сила F для того, чтобы груз F' поднялся на 10 cm? Назвать S и S' пути, проходимые точкой приложения силы F и грузом F'.

5) Высчитать $F \times S$ и $F' \times S'$, $F' : F$ и $S : S'$. Высчитать также коефициент полезного действия η, т.-е. $(F' \times S') : (F_1 \times S)$. Чем подтверждается закон сохранения энергии? Как велик выигрыш силы? Какую цель преследует данный блок?

II. **Подвижный блок.** 6) Свесить ролик с обоймицей.

7) Проделать опыты и вычисления, подобные указанным под №№ 2—5; при этом, исполняя № 3, не прибавлять силу тяжести безмена к силе, указываемой им, но зато прибавить тяжесть блока к тяжести груза; полученная сумма даст значение F' в формуле, выражающей закон сохранения энергии [1]).

8) Ответить на вопросы № 5.

III. **Полиспаст.** С одним из полиспастов III (1) или III (2) проделать опыты, вычисления и решить вопросы, указанные для неподвижного блока. Иметь в виду, что нижняя обоймица поднимается вместе с грузом.

IV. К свободному концу шнурка полиспаста привесить небольшую гирьку, а груз снять и вместо него прицепить безмен. Тянуть за безмен, замечая его показание. Какой смысл может иметь такое применение полиспаста?

[1]) Но, вычисляя η, нужно под F' понимать только тяжесть груза; а вместо F_1 взять F_2, так как здесь при подъеме груза сила безмена действует вверх.

Схема записей.

Вес безмена = ... g.
Вес ролика с обоймицей = ... g.
Вес обоймицы полиспаста = ... g.

Опыт	F_1	F_2	F	S	F'	S'
I						10 cm
II						10 cm
III						10 cm

Подсчеты:

	Закон сохранения энергии		Выигрыш силы			η
	$F \times S$	$F' \times S'$	$F' : F$	$S : S'$	Число шнурков, поддерживающих груз	
I						
II						
III						

Рис. 84. Тали.

Вопросы. 1. Кровельщики и маляры иногда поднимаются при поправке и окраске водосточных труб, сидя на дощечке, привязанной, как качели, к веревке, которая пропущена через неподвижный блок, укрепленный вверху, при чем другой конец веревки держит в руках сам рабочий. С какой силой должен он тянуть за веревку?

2. Нельзя ли устроить блок без роликов? [1]) Если можно, то зачем ролики?

3. Почему полезное действие блока (или системы блоков) всегда меньше, чем полезное действие рычага (или системы рычагов)?

4. Нарисовать схему полиспаста, дающего выигрыш силы в 4 раза.

[1]) Можно. Простейшая форма неподвижного блока, это — веревка, перекинутая через неподвижный горизонтальный цилиндр. На рис. 84 показано устройство полиспаста или „талей“ без роликов. Такие тали употребляются на парусных судах для натягивания „вант“ — канатов, которые удерживают с боков мачту в вертикальном положении.

ГЛАВА IX.

О кинетической энергии.

§ 118. Выражение кинетической энергии. — Мы знаем, что потенциальная энергия поднятого груза равна силе его веса, умноженной на высоту поднятия. По мере того как груз падает, потенциальная энергия его убывает; если пройденное грузом расстояние в сантиметрах есть h, если сила веса груза (в динах) равна p, то убыль потенциальной энергии (в эргах) будет ph.

При падении тела в пустоте вся затраченная потенциальная энергия переходит в **кинетическую энергию.** Кинетическая энергия проявляется движением тела. Сколько исчезло потенциальной энергии, столько же кинетической должно появиться. В нашем примере количество появляющейся кинетической энергии есть ph [1]).

Но такое выражение кинетической энергии мало пригодно. Им, например, нельзя воспользоваться для того, чтобы высчитать кинетическую энергию движущегося вагона или летящей пули. По определению, кинетическая энергия обусловливается движением тела. Она, естественно, зависит от *скорости движения* тела и от *массы* тела. Поэтому поставим себе задачу: *найти выражение кинетической энергии тела через массу его* m *и через его скорость* v.

Обращаясь к нашему падающему грузу, рассуждаем так: по § 72 сила веса груза p равняется mg, где m — масса груза (в граммах), g — ускорение, сообщаемое ему силою тяжести $\left(980\,\frac{cm}{sec^2}\right)$; пройденное же грузом расстояние $h = {}^1/_2\, gt^2$ (§ 54). Поэтому выражение энергии ph можно преобразовать в $mg \times {}^1/_2\, gt^2$ или ${}^1/_2\, mg^2t^2$. Но, по § 55, $v = gt$; делая замену в предыдущем выражении, получаем следующую формулу для кинетической энергии тела:

$$ {}^1/_2\, mv^2. $$

Мы видим, что **кинетическая энергия тела выражается половиной произведения массы тела на квадрат его скорости.**

Если массу тела выражать в граммах, скорость в $\frac{cm}{sec}$, то кинетическая энергия выражается в эргах. Если массу выражать в тоннах, скорость в $\frac{m}{sec}$, то кинетическая энергия выразится в килоджоулях (kJ).

---

[1]) Количество энергии, переходящее из одного вида в другой, мерится той работой, которая совершена при переходе. В данном случае это — работа силы тяжести p на пути h, т.-е. ph. Часто выражаются так: работа силы затрачивается на создание кинетической энергии. Но этот способ выражения не вполне точен.

Замечание. Иногда называют кинетическую энергию весьма неподходящим термином *живая сила*. Энергию кинетическую и потенциальную можно объединить под общим названием *механической энергии*.

Задача. Вычислить кинетическую энергию товарного вагона, весящего вместе с грузом 27 тонн и движущегося со скоростью $30\,\frac{km}{h}$.

Реш. $30\,\frac{km}{h} = 30 \times \frac{1000\ m}{3600\ sec} = \frac{25\ m}{3\ sec}$; ${}^1/_2\, mv^2 = {}^1/_2 \times 27\ t \times \frac{625\ m^2}{9\ sec^2} = 937{}^1/_2$ kJ.

§ 119. Действие маховых колес. — Положим, что обод махового колеса паровой машины (рис. 85) весит 400 kg, а средний диаметр его равен 1.2 m. Нормальное число оборотов в минуту пусть будет 120. Высчитаем кинетическую энергию обода. При каждом обороте какая-нибудь часть *a* обода проходит путь $3.14 \times 1.2 = 3.77$ m, а так как время одного оборота — ${}^1/_2$ sec, то скорость частей обода $3.77\ m : {}^1/_2\ sec = 7.5\,\frac{m}{sec}$. Отсюда кинетическая энергия ${}^1/_2 \times 0.4 \times 7.5^2 = 11{}^1/_4$ kJ. Эта энергия маховика остается *в среднем* постоянной; но она возрастает, когда поршень паровой машины начинает двигать маховик с бо́льшей скоростью; наоборот, она убывает, если сила поршня становится недостаточной.

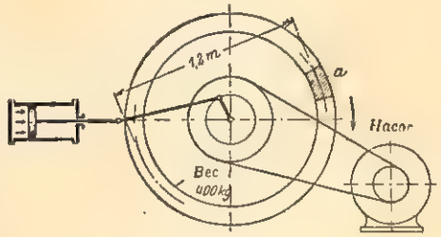

Рис. 85.

Поясним только что сказанное. Пусть паровая машина приводит в действие насос для подъема воды, при чем в насосе тратится при каждом обороте количество энергии, нормально подаваемое паровой машиной — скажем, $3{}^1/_2$ kJ. Что произошло бы, если бы в работе паровой машины вдруг наступила большая неравномерность, напр., если за какой-нибудь оборот машины пар совсем не поступит в цилиндр, так что поршень не разовьет на этот раз никакой силы?

Легко видеть, что работа насоса от этого не прекращается. В маховике имеется достаточный запас энергии, чтобы уделить насосу количество, потребное за один оборот; и в маховике еще останется $11{}^1/_4 - 3{}^1/_2 = 7{}^3/_4$ kJ. Конечно, вращение маховика при этом замедлится; не трудно рассчитать, что после рассматриваемого оборота скорость его частей будет только $6.23\,\frac{m}{sec}$. Поэтому в последующее время машина должна произвести бо́льшую работу, чтобы, сообщив маховику ускорение, снова довести его скорость до нормы.

Когда мы ближе познакомимся с устройством паровой машины, нам будет ясно, что она работает, так сказать, толчками: поршень то развивает большую силу, то не развивает никакой. Если кинетическая энергия маховика *достаточно велика*, то эти колебания в *приходе* работы не играют роли, и установка действует приблизительно равномерно. Это очень важно, напр., при превращении механической энергии в электрическую, так как иначе сила света ламп, включенных в сеть тока, давала бы колебания.

С другой стороны, маховое колесо скрадывает колебания, происходящие от неравномерного *расхода* работы. Напр., механическая мастерская расходует больше или меньше энергии в зависимости от того, сколько работает станков. Если останавливается какой-нибудь большой станок, то излишек энергии остается в маховике: он начинает вращаться быстрее. Тогда автоматически начинает действовать „регулятор", уменьшающий подвод пара в цилиндр. В небольших керосиновых и т. п. двигателях при этом прекращается даже подвод горючего на целом обороте (как это мы предполагали выше для паровой машины).

§ 120. Затрата энергии при приведении машин в движение. — Вернемся к примеру механической лебедки, поднимающей вагонетки с углем (§ 115). Мы предполагали вес груза 1750 kg, скорость подъема $^1/_3 \frac{m}{sec}$. Для того, чтобы груз от состояния покоя перешел к состоянию движения с этой скоростью, необходимо сообщить ему запас кинетической энергии $^1/_2 \times 1.75 \times {}^1/_9 = 0.1$ kJ или $= 10$ kgm (приблизительно), а значит, машиной должна быть затрачена работа, равная этому запасу. Это количество невелико, если сравнить его с затратой работы при равномерном подъеме $\left(580 \frac{kgm}{sec}\right)$; но иначе обстоит дело в новейших быстроходных кранах, которые развивают скорость до $4 \frac{m}{sec}$, так что здесь расход работы на создание скорости был бы $^1/_2 \times 1.75 \times 16 = 14$ kJ или 1400 kgm. Кроме того, для сбережения времени надо достигнуть указанной скорости в возможно короткий промежуток времени; если, напр., скорость в $4 \frac{m}{sec}$ достигается в течение $^1/_3$ sec, то ускорение, которое нужно придать грузу, будет $4 \frac{m}{sec} : {}^1/_3 \text{ sec} = 12 \frac{m}{sec^2}$; оно на 20% больше, чем ускорение тяжести, а значит, и сила, которую должна развивать машина *только* ради ускорения груза (независимо от преодоления силы тяжести), будет на 20% больше силы веса груза; в общем, от машины в периоде ускорения потребуется сила $1750 + 1750 + 350 = 3850$ kg*, и, значит, мощность ее должна быть соответственно больше мощности, требуемой при равномерном поднятии. Сюда при полном расчете надо прибавить еще ту энергию, которая необходима для пуска в ход самой машины.

Замечание. Ускоряющая сила, о которой только что говорилось, имеет еще другое важное значение. Присоединяясь к силе, преодолевающей тяжесть груза, она дает вычисленный нами результат 3850 kg*: с такой силой машина тянет груз в периоде ускорения. Но с такой же силой и *груз тянет машину* (хотя бы в течение короткого времени): это обстоятельство должно быть принято во внимание при расчете устойчивости крана и прочности его частей.

§ 121. Артилерийский снаряд. Ударное действие. — Газы, развивающиеся в дуле орудия при взрыве пороха, имеют чрезвычайно высокое давление, которое сообщает очень большую скорость вылетающему снаряду.

Пусть снаряд весит 300 kg и при вылете из орудия имеет начальную скорость $600 \frac{m}{sec}$; энергия снаряда будет $^1/_2 \times 0.3 \times 360\,000 = 54\,000$ kJ. Часть этого запаса растрачивается при преодолении сопротивления воздуха, а остаток расходуется на работу разрушения той цели, в которую направлен снаряд, и самого снаряда. Допустим, что этот остаток равен 40 000 kJ или 4 000 000 kgm, и что снаряд попадает на твердую стальную плиту броненосца, куда он в состоянии проникнуть только на 10 cm или на 0.1 m. Мы можем рассчитать, какую силу (в среднем) развовьет снаряд на этом пути: сила $= \frac{\text{работа}}{\text{путь}}$, в данном случае $\frac{4000000 \text{ kgm}}{0.1 \text{ m}} = 40000000$ kg*.

Этот пример служит пояснением следующей истины: результатом *удара* тел, т.-е. сильного, но кратковременного действия их друг на друга является разрушение их. Это положение тем лучше оправдывается, чем меньше масса ударяющего тела по сравнению с массой ударяемого тела. Потому-то, когда нужно расковать кусок металла, его кладут на массивную наковальню и ударяют молотом, гораздо менее массивным. Другой пример — разбивание заклепок.

Если мы захотим вбить гвоздь в дерево чересчур легким молотком, это нам не удастся: мы можем только испортить и гвоздь и молоток. Наоборот, если мы, приставив тот же гвоздь к дереву, ударим по нем обухом топора, он легко входит в дерево (которое, согласно сказанному выше, терпит разрушение под гвоздем). По тому же самому для вбивания свай в землю пользуются массивными „бабами", — в несколько тонн.

Ввиду сказанного, в машиностроении по возможности избегают ударного действия. Если в машине механизм износился и неисправен, так что между частями образовались зазоры, и одна часть с большою скоростью сталкивается с другой, то такая машина обыкновенно скоро приходит в состояние полного разрушения. В нормальных условиях всякая машина должна работать без толчков: если машинист услышит толчки, он должен немедленно постараться устранить их причину.

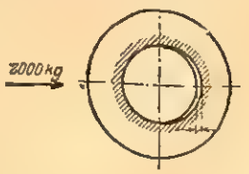

Рис. 86.

Положим, что в подшипнике вала паровой машины (рис. 86) имеется зазор в 1 mm, и что при прямом и обратном ходе вал,

под действием силы шатуна в 2000 kg*, двигается один раз вправо и один раз влево, ударяя при этом на „вкладыши“ подшипника. Расходуемая при этом работа будет $2 \times 2000 \times 0.001 = 4$ kgm. Если машина делает 3 оборота в секунду, то *ежесекундно* будет расходоваться $3 \times 4 = 12$ kgm только на разрушение машины. Это соответствует мощности почти в $^1/_6$ лош. силы: результат будет такой, как если бы 1—2 человека колотили по машине тяжелыми молотами.

ГЛАВА X.

О трении.

§ 122. Сила трения. — Когда соприкасаются поверхности двух тел A и B (рис. 87), то обыкновенно в месте их соприкосновения замечается сила Q, составляющая угол с прямой TT, касательной к обеим поверхностям. Разложим эту силу на две составляющие: одну F, вдоль касательной линии TT, другую N—перпендикулярную к TT. Вторая сила называется *давлением одного тела на другое*; первая называется *трением*. **Сила трения всегда сопротивляется движению одного тела по поверхности другого.** Ее возникновение объясняют тем, что поверхности тел никогда не бывают абсолютно гладки; тела своими мельчайшими неровностями зацепляют друг друга и потому как бы держат друг друга с некоторой силой.

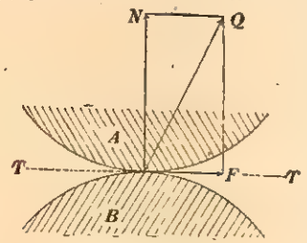

Рис. 87.

Изучим законы трения на опыте.

§ 123. Лабораторная работа № 14. — *Исследовать законы трения при скольжении двух тел.*

Необходимые предметы: 1) гладкая деревянная доска, размером 1 m × 18 cm × 3 cm, с одной стороны обитая железом; 2) доска, так же устроенная, но длиною раза в 4 меньше предыдущей, с кольцом, ввинченным в одну из торцовых сторон; 3) пружинный безмен; 4) несколько кирпичей равного веса; 5) машинное масло; 6) тряпка; 7) кусок клетчатой бумаги.

Способ выполнения. 1) Определить вес короткой доски и вес кирпича.

2) Положить длинную доску горизонтально, деревянной стороной кверху. Укрепить ее струбцинкой или наложенными на заднем конце тяжестями. Близ заднего ее конца положить на нее короткую доску, деревянной стороной вниз, кольцом вперед. На короткую доску положить кирпич.

3) Прицепив крючок безмена к кольцу доски и держа безмен горизонтально, тянуть безмен потихоньку рукою, пока верхняя доска не начнет скользить по нижней. Продолжать тянуть так, чтобы доска двигалась медленно и равномерно. Как изменяется показание указателя?

4) За время равномерного движения сделать около 5 отсчетов по безмену и взять из них среднее. Получится значение *силы трения* F при данном давлении N (равном силе веса верхней доски и кирпича).

5) Повторить опыты 3 и 4 еще два-три раза, при различной скорости равномерного движения. Зависит ли сила трения от скорости скольжения?

6) Взять среднее из всех полученных значений F и записать его в таблицу, составленную по нижеуказанной схеме.

7) Последовательно накладывая на верхнюю доску по кирпичу, повторить №№ 3—6.

8) Наложить доски железными поверхностями друг на друга и повторить №№ 3—7.

9) Положить доски один раз так, чтобы дерево скользило по железу, а другой раз — так, чтобы железо скользило по дереву. Повторить №№ 3—7.

10) Смазать жирно маслом железные поверхности и, наложив их друг на друга, повторить №№ 3—7.

11) Вытереть досуха железные поверхности.

12) Вычислить для каждой комбинации поверхностей и для каждой нагрузки отношение $k = \frac{F}{N}$. Каким свойством оно обладает? Взять среднее из полученных значений k для каждой комбинации поверхностей; это будет *коефициент трения*.

13) Изобразить результаты опытов графически, откладывая на осях значения N и F. Какие линии получаются?

14) Во сколько раз уменьшился коефициент трения благодаря смазке?

Образчик записи.

Трение дерева по дереву (без смазки).

№ опыта.	N	F	$k = \frac{F}{N}$
1			
2			
3			
. . .			
		Среднее	

Вопросы. 1) Отчего при переходе верхней доски из состояния покоя в состояние движения показание безмена бывает больше, чем при равномерном движении? (Влияние ускорения.)

2) Как велика будет сила трения между двумя железными поверхностями под давлением в 1000 kg*?

выражаются железнодорожники[1]). Не будь трения, различные предметы не стояли бы на тех местах, куда мы их ставим, а соскальзывали бы в возможно низкое место. Без трения мы не могли бы взять в руку никакой вещи: она выскальзывала бы из рук еще настойчивее, чем это делает кусок мокрого мыла. Без трения нельзя было бы завязать узла, и т. д.

Из этого видно, что во множестве случаев трение является благодетельной силой.

§ 128. Куда девается энергия, затрачиваемая на трение. — Энергия, затрачиваемая на преодоление трения, превращается в особую форму энергии — тепловую энергию или *теплоту*. Это можно видеть, напр., из того, что подшипники вала паровой машины сильно нагреваются—гораздо сильнее, чем другие части станины. В небольших машинах подшипник постоянно теряет свою теплоту вследствие соприкосновения с более холодным окружающим воздухом. В больших машинах этого бывает недостаточно: здесь приходится охлаждать подшипники холодной водой, которая постоянно нагнетается через ход, сделанный в корпусе подшипника.

Если подшипник нагреется выше допустимой температуры, то масло делается слишком текучим и выдавливается из пространства между шейкой вала и охватывающими ее „вкладышами" подшипника. Шейка и вкладыши приходят в непосредственное соприкосновение, трение между ними становится чересчур большим, и слишком нагревшиеся поверхности, утратив свою сопротивляемость, начинают заедать. При этом вкладыши нагреваются часто докрасна, так что остатки масла загораются. От этой причины нередко бывают пожары на хлопчато-бумажных мануфактурах, в железнодорожных поездах, на мельницах и вообще там, где большая механическая работа передается при больших скоростях.

§ 129. Родство между энергией механической и энергией тепловой. — Установлено, что присущая какому-нибудь телу теплота заключается в быстрых движениях мельчайших частиц его — „молекул" и „атомов." Если бы наши чувства были гораздо острее, чем они есть в действительности, — если бы мы были в состоянии наблюдать молекулы, — то мы бы не могли найти различия по существу между механической энергией и тепловой энергией.

Отсюда уясняется та легкая возможность превращения механической энергии в теплоту, какая имеет место в явлениях трения, а также в некоторых других явлениях (удар, сжатие).

---

[1]) Чтобы помочь горю, приходится посыпать рельсы песком, т.-е. обращаться к трению за помощью.

ОТДЕЛ ВТОРОЙ.

Механические свойства вещества в твердом, жидком и газообразном состоянии.

ГЛАВА XI.

Твердые тела.

§ 130. Твердые вещества, как главный материал для сооружений. — Машины, мосты, постройки разного рода сооружаются из *твердых* тел; лишь изредка в состав некоторых машин входят также тела жидкие или газообразные. **Для твердых тел характерно их стремление сохранять приданную им форму.** Однако всякая сила, **как бы она ни была мала, изменяет форму твердого тела, к которому она приложена.** В инженерной лаборатории при помощи опыта можно показать, что железная балка *прогибается* не только от надавливания на нее пальцем, но даже от дутья на нее ртом. А достаточно большая сила может разрушить любое тело[1]).

При построении машины или какого-нибудь сооружения стремятся, конечно, к наибольшей прочности их. Но для расчета прочности необходимо предварительное знание свойств материалов, служащих для построения; необходимо изучить способность этих материалов *сопротивляться* действующим на них силам, стремящимся произвести изменение формы—**деформацию**[2])—или даже нарушение целости.

§ 131. Деформации твердых тел. — Рассмотрим, каким именно деформациям могут подвергаться твердые тела от действия приложенных к ним сил.

Нам помогут при этом уже известные нам примеры.

Обратимся к рис. 60, изображающему поворотный кран. а) Груз, висящий на канате, *растягивает* его и при недостаточной толщине каната может *разорвать* его. б) Фундамент крана, куда передается сила тяжести крана и поднятого им груза, *сжи-*

---

[1]) Отсюда не вытекает, чтобы первоначальной причиной разрушения, напр., большой машины могла быть только большая сила. Наоборот, вследствие взаимной связи частей машины, иногда поломка какого-нибудь болтика может повлечь за собой полную порчу и крупных частей машины.

[2]) Лат. deformatio значит *искажение, изменение формы.*

мается этими силами; при недостаточных размерах фундамента в нем получатся трещины, и он *раздробится* на куски. в) Укосина *изгибается* тяжестью груза, подвешенного к ее концу. При недостатке прочности она может *сломаться*.

г) Обратимся теперь к рис. 66, изображающему ворот. Здесь сила человека P, приложенная к колесу, посаженному на один конец вала, стремится вращать вал по часовой стрелке, а натяжение Q веревки, приложенное к другому концу вала, стремится вращать вал против часовой стрелки. Таким образом эти две силы *скручивают* вал.

д) Наконец посмотрим на рис. 92, где изображено соединение деревянной балки A „кронштейна" с укосиной B (левые концы балки и укосины закреплены в стене). Наклонная сила P, направленная по укосине, дает горизонтальную составляющую F, которая может *сколоть* кусок балки по линии *ab*. Деформация, приводящая к такому случаю разрушения, называется *сдвигом*.

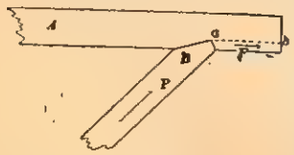

Рис. 92.

Таким образом имеем следующие 5 видов простых деформаций:

а) *растяжение*, которое может повести за собой *разрыв;*
б) *сжатие*, последствием которого может быть *раздробление;*
в) *изгиб* или *гнутие*, могущее окончиться *изломом;*
г) *кручение;*
д) *сдвиг*, могущий привести к *скалыванию* или *срезыванию* [1]).

§ 132. Закон Гука. Остаточная деформация. Предел упругости. — Для всякой деформации, покуда она мала, имеет место **закон Гука**, с которым мы уже познакомились в § 20: **величина деформации пропорциональна деформирующей силе.**

---

[1]) Все эти деформации, или порознь или по нескольку зараз, постоянно встречаются при обработке материалов. Приведем примеры деформации сдвига, заканчивающейся срезыванием. Рис. 93 изображает в увеличенном виде разрезание толстого металлического листа ножницами. До сдвига точки ABCD внутри материала были расположены по вершинам квадрата, а после сдвига они окажутся в вершинах параллелограма AEFC. Таким образом часть BD *сдвинулась* параллельно части AC. Рис. 94 изображает

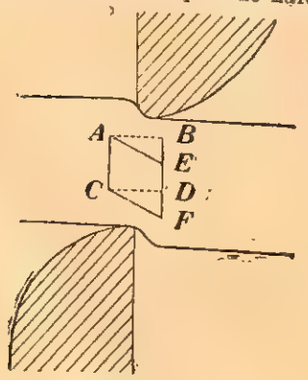

Рис. 93.

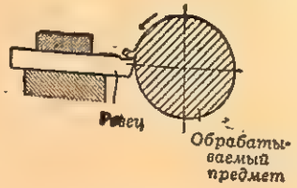

Рис. 94.

ход токарной работы: обрабатываемый предмет приводится в быстрое вращательное движение, а в это время прижимающийся к нему неподвижный стальной резец *срезывает* с него стружку.

Легко проследить этот закон на опыте для *гнутия*. Для этого надо деревянный, а лучше металлический стержень, размером примерно 70 cm × 2 cm × 0.2 cm, положить концом на две опоры и, привесив к его середине крючок, снабженный внизу легкой чашкой, а сверху указателем, нагружать чашку различными грузами, следя при помощи указателя и масштаба, поставленного вертикально против середины стержня, на сколько будет опускаться середина стержня. Понижение указателя при нагрузке сравнительно с его ненагруженным состоянием, или так называемая „стрела прогиба", служит здесь мерой деформации гнутия; и мы увидим, что стрела прогиба будет изменяться пропорционально нагрузке стержня.

Если удалить нагрузку, стержень опять распрямится (т.-е. при силе равной 0, деформация = 0), как и следует по закону Гука. Однако такое распрямление стержня будет иметь место лишь в том случае, если во время опытов нагрузки не были чересчур велики. В противном случае по снятии нагрузки стержень окажется изогнутым или, как говорят, получит **остаточную деформацию**. Это показывает, что при увеличении деформации наступают такие условия, когда закон Гука уже не имеет места (потому что при силе равной 0, деформация не равна 0).

Те деформации, которые не имеют остаточного характера, называются **упругими**. А когда появляются первые признаки остаточной деформации, тогда говорят, что достигнут **предел упругости**.

§ 133. Вещества упругие, мягкие, хрупкие. — Если вещество подверглось довольно значительной деформации и все-таки, по прекращении действия силы, вполне восстановляет свою прежнюю форму, мы называем его **упругим**. Примеры: резина, мягкая сталь, слоновая кость.

Если же прежняя форма восстанавливается только после очень маленьких деформаций, а несколько бо́льшие деформации уже частью остаются, то мы называем такой материал **неупругим**, или **мягким**, или **ковким**, или **вязким**, или еще — **пластичным**. Примеры: свинец, мокрая глина, тесто.

Очень пластичным материалом является железо в раскаленном состоянии, чем и обусловливается его широкая применяемость [1]).

---

[1]) На рис. 95 показаны вальцы, служащие для прокатки железнодорожных рельсов. Изготовленный на сталелитейном заводе прямоугольный брус или „болванка", накаленная добела, пропускается через первое отверстие или „ручей" вращающихся в противоположные стороны „вальцов", которые немного сжимают ее. Затем ее пропускают через второй ручей, который сжимает ее больше, и т. д., пока не получится готовый рельс. Так же изготовляются железные балки, полосы, листы определенных сечений („сортовое", „фасонное" железо).

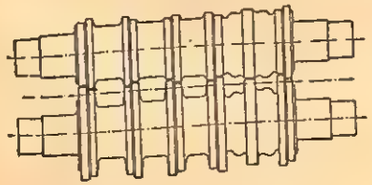
Рис. 95.

Среди упругих веществ некоторые отличаются тем свойством, что, при постепенно увеличивающемся деформировании тела, оно разрушается раньше, чем станет получаться остаточная деформация. Такие вещества зовутся **хрупкими**. Примеры: стекло, сильно закаленная сталь.

§ 134. Прочность различных веществ по отношению к различным деформациям. — Для наиболее важных в техническом отношении материалов производились опыты, имевшие целью установить, при какой нагрузке разрушается вещество, подвергающееся деформации. При этом оказалось, что разрушение наступает, когда сила, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения тела, достигает определенной для данного материала величины.

Так, напр., если железный стержень с поперечным сечением в 0.5 cm^2 закреплен своим верхним концом, а к нижнему концу мы привешиваем грузы, постепенно их увеличивая, и если при нагрузке в 2500 kg^* стержень разрывается, то мы скажем, что материал разорвался при растягивающем **усилии** в $\frac{2500\ kg^*}{0.5\ cm^2} = 5000 \frac{kg^*}{cm^2}$ (килограммов на кв. сантиметр).

Вообще **усилием** называется частное от деления силы на ту площадь, по которой эта сила равномерно распределена.

В следующей таблице показаны значения **разрушающих усилий** для различных материалов при деформациях растяжения, сжатия, гнутия и сдвига.

Материал	Разрушающее усилие в килограммах на кв. сантиметр			
	При растяжении	При сжатии	При гнутии	При сдвиге
Сталь мягкая с 0.14% углерода	5000	4000	—	—
„ твердая с 0.51% углерода	6500	4600	—	—
„ инструментная с 0.96% углер.	9500	6700	—	—
Стальная проволока	8000	—	8000	—
Железо тянутое	6100	2500	3000	2800
„ отожженное [1])	4700	—	—	—
„ литое	4500	—	—	—

[1]) Отжиганием металла называется нагревание его до темнокрасного цвета и последующее медленное охлаждение. Железная проволока при изготовлении становится более твердой и хрупкой; ее отжигают, чтобы она легко гнулась, не ломаясь. Медь также вследствие ковки делается хрупкой; отжигание сообщает ей снова „вязкость“.

Материал	Разрушающее усилие в килограммах на кв. сантиметр			
	При растяжении	При сжатии	При гнутии	При сдвиге
Железо сварочное [1])	4000	3700	—	3700
Чугун	от 1000 до 2200	от 3700 до 8800	—	—
Латунь	2200	800	—	—
Латунная проволока	3700	—	—	—
Медь	2400	4200	—	—
Медная проволока	4200	—	—	—
Фосфористая бронза [2])	4000	—	—	—
То же в виде проволоки	11000	—	—	—
Свинец	от 130 до 220	—	—	—
Дерево вдоль волокон:				
Ясень	1200	—	—	—
Сосна	700	400	—	50
Дуб	700	700	700	50
Кирпич	20	60	—	—
Кожа (ремень)	300	—	—	—

Из этой таблицы мы видим, что не только примеси, но также способ изготовления и характер обработки сильно изменяют прочность материала. Напр., металлическая проволока всегда прочнее, чем куски того же металла, не подвергавшиеся „волочению“.

§ 135. Решим несколько задач на вычисление прочных размеров частей сооружений.

Задача 1. Какой толщины надо взять круглый железный прут, чтобы на нем подвесить к потолку залы люстру весом 250 kg?

Решение. Будем искать сначала поперечное сечение S железного стержня, разрывающегося от растяжения силой в 250 kg^*. По предыдущей таблице имеем $250 : S = 4000$ (предполагается сварочное железо), отсюда $S = {}^1/_{16}\ cm^2$. Но ясно, что таким сечением ограничиться нельзя; для уверенности в том, что разрыв невозможен, надо сделать значительный „запас“. Число, на основании практики показывающее, во сколько раз именно надо увеличить сечение расчитываемой части, чтобы можно было считать прочность ее обеспеченной, называется **коефициентом прочности**. Следующая таблица дает принимаемые значения коефициентов прочности для различных веществ и при различных условиях.

[1]) Сварочное железо, в отличие от литого, получается, благодаря более низкой температуре печи, не в жидком, а в тестообразном состоянии. При этом отдельные, нарождающиеся из жидкой массы, зерна железа слипаются („сваривается“) между собой в зубчатую массу — „крицу“.

[2]) Сплав меди (90—95%), олова и небольшого количества фосфора.

Материал	Коефициент прочности		
	При постоянной нагрузке	При переменной нагрузке или в случае колебаний	Для сооружений, подверженных толчкам
Железо и сталь . .	3.5	от 5 до 8	от 10 до 12
Чугун	5	от 6 до 10	15
Медь и ее сплавы (латунь, бронза) .	5	от 6 до 9	от 10 до 15
Дерево	7	от 10 до 15	20
Кирпичная кладка[1])	20	30	50 и больше

В рассматриваемом случае люстра может приходить в колебательное движение от сотрясений потолка, тогда и в пруте возникнут продольные колебания. Поэтому будет правильно взять коефициент прочности около 6; тогда искомое сечение прута будет $6S = 0.375$ cm². Диаметр же его будет $2\sqrt{\frac{0.375}{3.14}}$ cm $= 7$ mm (приблизительно).

Задача 2. В нижнем этаже здания предполагается большая зала, в 13 m ширины; балки посредине их длины нужно будет подпереть кирпичными столбами. Как велико должно быть поперечное сечение такого столба, если на каждый столб придется давление, равное весу участка пола, площадью $6.4 \times 0.75 = 4.8$ m², а вес квадратного метра пола—600 kg?

Реш. Как в предыдущей задаче, будем сначала исходить из площади S сечения столба, как раз раздавливаемого данной нагрузкой, а затем помножим S на коефициент прочности. Чтобы по возможности упростить решение подобных задач, выгодно составить общую (буквенную) формулу. Пусть данная нагрузка столба (или вообще рассматриваемой части) будет Q, а разрушающее усилие пусть будет p; тогда $Q : S = p$, откуда $S = Q : p$; вводя коефициент прочности K, получим окончательно $KS = \frac{KQ}{p}$, т.-е. *площадь прочного сечения равняется данной нагрузке, умноженной на коефициент прочности и деленной на разрушающее усилие.* В данном примере мы примем коефициент прочности,

[1]) Особенно большие значения коефициента прочности для кирпичной кладки обусловливаются тем, что материал этот неоднородный, а кладка ведется обыкновенно так, что внутри остаются пустоты, да и нагрузку приходится производить раньше, чем окрепнет известковый цемент.

согласно с указанием „Урочного Положения“[1]), равным 50; получится $KS = \frac{50 \times 4.8 \times 600}{60} = 2400$ cm² $= 0.24$ m².

Задача 3. Подпорный столб, высотою 30 m, сделан из четырех полос „углового“ железа[2]) в (8.25+8.25) cm ширины и 1.25 cm толщины. Полосы эти расположены по углам столба и соединены поперечинами, удерживающими их от гнутия; таким образом размеры столба расчитываются по одному сопротивлению сжатию. Вычислить наибольшую нагрузку столба при условиях прочности, считая нагрузку переменной и принимая поэтому коефициент прочности 8.

Реш. Площадь сечения одной полосы $16.5 \times 1.25 = 20.6$ cm², а всех четырех $\backsim 82$ cm². Пользуясь формулой, выведенной в задаче 2, составляем уравнение: $32 = \frac{8 \times Q}{3700}$, откуда $Q = 38\,000$ kg*.

Задача 4. Считая, что растягивающая нагрузка в $80 \frac{\text{kg*}}{\text{cm}^2}$ удовлетворяет условиям прочности каната из хорошей пеньки (для морского дела), найти, какую нагрузку может безопасно выдерживать канат, имеющий в окружности 1 cm[3]).

Реш. При данном усилии, нагрузка пропорциональна площади сечения. Если окружность равна l, то диаметр $d = \frac{l}{\pi}$, площадь круга $= \frac{\pi d^2}{4} = \frac{l^2}{4\pi}$. На эту площадь допустима нагрузка $\frac{80 l^2}{4\pi} = 6.4 \times l^2$ kg*.

§ 136. Упругая энергия. — При всякой деформации деформирующая сила двигает точку своего приложения, а, стало быть, совершает работу: другими словами, на производство деформации затратится энергия. Количество совершонной работы (затраченной энергии) нетрудно высчитать.

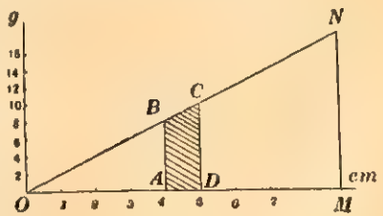

Рис. 96

Положим, что мы растягиваем пружину вроде того, как описано в § 20, не доходя до предела упругости. Наклонная прямая рис. 96 пусть будет графическим изображением зависимости между удлинением и нагрузкой. Когда мы, имея нагрузку, например, в 8 g, прибавляем еще 2 g, пусть пружина удлиняется на 1 cm; при этом сила, растягивающая ее (равная силе пружины), изменяется с 8 g* до 10 g*; можно сказать, что *в среднем* за это

[1]) „Урочное Положение“—книга, содержащая принятые у нас правила касательно работ земляных, плотничных, столярных, кузнечных, печных, дорожных и др., а также касательно заготовления материалов, их удельного веса и пр.

[2]) „Угловое“ железо в сечении имеет фигуру Г.

[3]) Толщину канатов выражают, указывая их окружность, так как легче измерить окружность, чем диаметр.

время сила равнялась 9 g*. Работа этой силы будет 9 g* × 1 cm, и легко видеть, что эта работа графически выражается площадью трапеции ABCD.

Применяя это рассуждение ко всем отдельным удлинениям при каждом отдельном увеличении нагрузки и складывая все отдельные работы, получим общую работу растяжения пружины: эта работа будет графически изображаться площадью треугольника OMN, в котором OM = l есть полное удлинение, а MN = P наибольшая нагрузка. По известной формуле геометрии площадь $OMN = {}^1/_2\, OM \times MN = {}^1/_2\, Pl$.

Итак, **энергия упругой деформации равна половине произведения деформации на деформирующую силу.**

Эту энергию можно получить обратно, разгружая пружину. Всякий раз, как мы снимаем маленькую часть груза, удерживаемого пружиной, остальная часть груза будет немного подтягиваться кверху, т.-е. сила пружины будет совершать работу, которая идет на создание потенциальной энергии тяжести.

Очевидно, что тело, подвергшееся упругой деформации, имеет в себе запас особой энергии, которую можно по предыдущему высчитать. Эта энергия называется **упругой энергией.**

Упругая энергия в некоторых случаях имеет важное практическое значение. Как пример, приведем работу карманных часов. Мы ежедневно даем им известный „заряд" такой энергии, закручивая их пружину; на счет этого заряда совершается целый ряд явлений, сопровождающихся превращениями энергии, сообщенной часам.

§ 137. Превращение энергии при деформации тел неупругих. — Иное превращение энергии бывает при деформациях, сопровождающихся остаточными деформациями. Здесь часть энергии (именно та часть, которая соответствует остаточной деформации) превращается в теплоту.

В случае тел весьма неупругих можно даже считать, что вся энергия, затраченная на их деформацию, превращается в теплоту.

Это подтверждается опытами. Свинцовый шар, упавший с высоты на каменную плиту, нагревается. Шляпка гвоздя заметно нагревается при частых ударах молотком.

ГЛАВА XII.

Жидкости в равновесии.

§ 138. Гидравлический пресс. — Мы поймем основное свойство жидкостей, изучив действие гидравлического пресса[1]). Устройство ручного пресса показано на рис. 97. Скалка p насоса коротким движением вверх засасывает воду через открывающийся вверх

[1]) Слово *гидравлический* — от греч. слов hydor = *вода*, aulos = *трубка*; французское presse = *жом, тиски*.

клапан v из резервуара C. При движении скалки вниз клапан v закрывается; тогда вода по трубке K, открывая клапан v', переходит в цилиндр пресса, под поршень P, называемый „нырялом", или (с англ.) „плунжером", и поднимает его с большой силой. Если на платформу, находящуюся наверху поршня P, положить какой-нибудь рыхлый материал (напр., кипу хлопка), то этот материал, будучи сдавлен между платформой и находящимся сверху неподвижным упором, спрессуется в меньший объем.

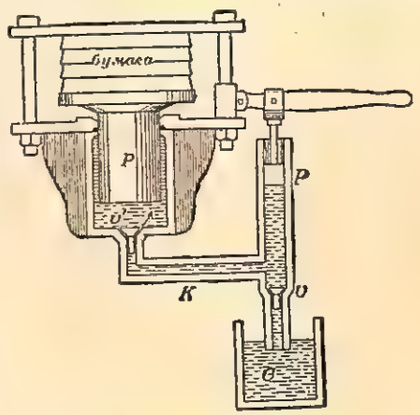

Рис. 97. Гидравлический пресс.

На рис. 97 не показаны некоторые важные части. У трубки K имеется предохранительный клапан, устроенный на манер рис. 58; он открывается в случае, если давление достигнет опасной величины, и выпускает воду. Если же откроем его нарочно, то большой цилиндр станет опускаться своей тяжестью и вытеснять воду.

Важную роль играет „воротник", благодаря которому поршень P может двигаться, не пропуская воду, и в то же время без большого трения. На рис. 98 показан разрез верхней части цилиндра пресса. Внутренняя кольцеобразная поверхность E плотно прилегает к поршню P; посредине ее выточен глубокий жолоб, в котором и помещается „воротник" из мягкой и плотной кожи. Через показанное на рисунке наклонное отверстие вода под давлением проникает под воротник и прижимает его изнутри с одной стороны к поршню, а с другой — к стенкам цилиндра (что обозначено на рисунке стрелками). Чем больше давление воды, тем плотнее кожа прилегает к металлическим частям пресса, не давая возможности просачиваться воде.

Рис. 98.

Главное удобство гидравлического пресса заключается в его плавном, медленном действии, постепенно усиливающемся до значительной величины. Его применения чрезвычайно разнообразны: в бумажном производстве — для отжимания бумаги или массы с целью удаления излишней воды; в маслобойном — для извлечения масла из семян; в металлическом — для холодной обработки металлов, в особенности для клепки, обжимки, разрезывания, пробивания дыр и т. п. Гидравлические прессы употребляются еще для испытания прочности кирпича и других материалов, для прессования сена, для надевания колес на оси, для выдавливания медных и свинцовых труб. Прессы огромной мощности, развивающие силу до 14 000 тонн, употребляются на железоделательных заводах для обработки тяжелых болванок из

литого железа; ими с выгодой заменяют употреблявшиеся прежде массивные паровые молоты.

На манер пресса устраиваются также гидравлические машины, служащие для производства механической работы в разнообразных случаях (напр., для открытия шлюзов, для поворачивания мостов, для поднимания понтонов в доках, вообще для подъема грузов, далее для передвижения артилерийских орудий и т. п.).

§ 139. Расчет гидравлической машины.—Пусть поперечное сечение малого поршня равно s, а большого поршня — S. Пусть малый поршень движется вниз с силой q, а большой поршень пусть выпирается кверху с силой Q. Если малый поршень опустится вниз на расстояние h, то объем воды, равный sh, будет переведен по трубке K в большой цилиндр, и большой поршень поднимется кверху на $\frac{sh}{S}$. Применим к нашей машине закон сохранения энергии. Сила q, действующая на малый поршень, совершит работу qh: это будет количество энергии, поглощенное машиной извне. Сила Q, действующая на большой поршень, совершит работу $Q \times \frac{sh}{S}$: это будет количество энергии, выделенное машиной. Оба количества энергии должны быть равны: $qh = Q \times \frac{sh}{S}$, откуда получаем:

$$q : Q = s : S.$$

Это означает, что **гидравлическая машина дает выигрыш силы во столько раз, во сколько раз поперечное сечение большого поршня превышает поперечное сечение малого**[1]).

§ 140. Закон Паскаля. — Последнюю пропорцию можно переписать так: $\frac{q}{s} = \frac{Q}{S}$. Мы видим, что частное от деления силы на площадь (или, как иногда выражаются, сила на единицу площади) имеет у обоих поршней одно и то же значение. Сколько kg* на 1 cm² развивает давящий на воду малый поршень, столько же kg* на 1 cm² развивает вода, давящая на большой поршень. Это объясняется тем, что, при небольшом передвижении малого поршня вниз, прилегающие к нему частицы жидкости должны будут также несколько передвинуться, оказывая давление на частицы, соседние с ними, а эти последние в свою очередь потеснят своих соседей, и т. д., при чем, вследствие присущей жидкому веществу способности частиц свободно скользить одна около другой по всем направлениям, степень тесноты размещения их будет одинакова по всей массе жидкости.

Частное из силы на площадь, по которой эта сила распределена, называется в данном случае **гидростатическим давлением**[2]) (или просто **давлением**); мы имеем „закон Паскаля", выражающий

[1]) Так как часть энергии тратится на трение, то на деле выигрыш силы (при работе машины) составит лишь около 0.7 полученного таким образом числа.

[2]) Гидростатическое давление представляет собою частный случай той величины, которая в § 134 была названа *усилием*.

основное свойство жидкостей: **гидростатическое давление передается жидкостью во все стороны в одинаковой мере.** Мы говорим „во все стороны", потому что наш результат, очевидно, не изменился бы, если бы большой поршень имел наклонное или даже горизонтальное положение. Мы подразумеваем притом, что давление, извне произведенное на малый поршень, передается не только большому поршню, но и стенкам цилиндров и трубок, и самим частицам жидкостей. На твердые тела, соприкасающиеся с жидкостью, силы гидростатического давления действуют **по направлениям перпендикулярным к поверхности**; что же касается частиц самой жидкости, то каждая из них испытывает от своих соседей давление *по всем направлениям*.

§ 141. Давление в весомой жидкости. — Рассмотрим влияние силы тяжести на гидростатическое давление. Пусть сосуд ABCD (рис. 99) наполнен жидкостью до уровня *ab*. Тогда верхний слой 1 давит своим весом на поверхность *cd*, и это давление, по закону Паскаля, передается всем ниже лежащим слоям; слой 2 своим весом давит на поверхность *ef*, и это давление точно так же передается всем слоям, лежащим ниже, и т. д. Частицы, лежащие в самом низу, испытывают давление всех верхних слоев.

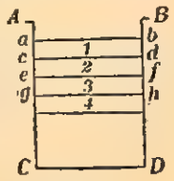

Рис. 99.

Мы видим, что **чем глубже находится какая-нибудь частица, тем бо́льшее давление она испытывает.**

Зная плотность жидкости, легко высчитать, какое давление производит жидкость на данной глубине: для этого достаточно высчитать вес вертикального столба жидкости, имеющего основание в 1 cm² и простирающегося от данной глубины до поверхности. Так, напр., вода на глубине 1 метра производит давление 0.1 килограмма на кв. сантиметр (пишется $0.1 \frac{kg^*}{cm^2}$), а ртуть на такой же глубине — давление $1.36 \frac{kg^*}{cm^2}$.

§ 142. Столб жидкости, как мера давления. — Отсюда следует, что всякое давление может быть измеряемо высотой столба какой-нибудь жидкости, который необходим для того, чтобы это давление произвести. Напр., давление в $1 \frac{kg^*}{cm^2}$ измеряется столбом воды в 10 метров, или столбом ртути в 10000 : 13.6 = 735 миллиметров. Столб жидкости, измеряющий давление, нередко называется **напором**.

§ 143. Опыты. — Стеклянная воронка A (рис. 100) затянута тонкой резиной и соединена резиновой трубкой с горизонтальной стеклянной трубкой TB, в которой помещается капля чернил B. Если подавить резиновую перепонку, то воздух, заключенный внутри прибора, передвинет каплю вправо: наш приборчик служит указателем давления.

Рис. 100.

1) Опустим воронку A в воду; тогда частицы воды, надавливая на резиновую перепонку, заставят ее вогнуться, и чернильная капля переместится тем далее, чем глубже опущена воронка. Отсюда видим, что давление внутри жидкости увеличивается с глубиной.

2) Если мы станем придавать воронке различные положения (A, a, b), помещая перепонку всякий раз в том же самом месте жидкости, мы не заметим смещения капли. Это показывает, что жидкость давит снизу вверх так же сильно, как сверху вниз или как вбок.

3) Будем перемещать воронку внутри жидкости, следя, чтобы резиновая перепонка оставалась все время на одной и той же глубине. Смещения капли не произойдет; это значит, что **в покоящейся жидкости господствует одинаковое давление во всех точках данной горизонтальной плоскости.**

§ 144. Сообщающиеся сосуды. — Предыдущие выводы остаются справедливыми, какую бы форму ни имел сосуд, вмещающий жидкость. Так, напр., если мы имеем два сообщающихся сосуда (рис. 101), содержащие *одну и ту же* жидкость, то во всех точках горизонтальной плоскости AB давление будет одинаково; во всех точках горизонтальной плоскости CD оно опять-таки одинаково.

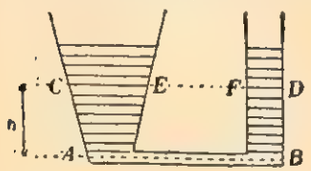

Рис. 101. Сообщающиеся сосуды.

Отсюда видим, что если в двух сообщающихся сосудах жидкость стоит на одной и той же высоте, то, значит, поверхности жидкости в обоих сосудах испытывают равное давление (напр., давление атмосферного воздуха).

§ 145. Открытый манометр. — Положим, что в двух сообщающихся трубках (рис. 102) мы имеем одну и ту же жидкость, но эта жидкость стоит в них не одинаково высоко: уровень A на h миллиметров ниже, чем уровень B. Это показывает, что давление, испытываемое поверхностью A, больше давления, испытываемого поверхностью B; разность давлений измеряется столбом жидкости в h миллиметров.

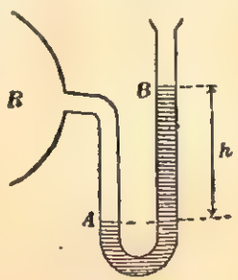

Рис. 102.

Если присоединить подобный прибор к пространству R, наполненному газом, причем трубка B открывается в атмосферный воздух, то мы сможем отсчитать, насколько давление газа в R отличается от давления атмосферного воздуха. Прибор называется **открытым манометром**[1]).

[1]) От греч. слова manós = *тонкий* (характеристика газообразного состояния), metró = *меряю*.

§ 146. Лабораторная работа № 15. — *Найти зависимость давления жидкости от глубины.*

Необходимые предметы: 1) стеклянная трубка длиною около метра, диаметром 4—5 cm, закрытая с одного конца каучуковой пробкой; 2) метровый масштаб, разделенный на миллиметры, с прикрепленной к нему U-образной стеклянной трубкой, диаметром около 5 mm; длинное колено трубки имеет длину около метра, короткое 6—10 cm (рис. 103); трубка содержит ртуть и служит манометром; 3) вода; 4) керосин; 5) штатив; 6) кусок клетчатой бумаги; 7) линейка.

Рис. 103.

Способ выполнения. 1) Наполнив широкую трубку водой на $^4/_5$, установить ее в штативе.

2) Погрузить туда манометр (в вертикальном положении) до наибольшей глубины; если в широкой трубке остается место, дополнить ее водой.

3) Отсчитать по масштабу с точностью до десятых долей миллиметра:

а) деление, против которого приходится плоская часть поверхности воды (см. рис. 13а);

б) деление, против которого находится верхушка ртутного столбика в коротком колене манометра;

в) деление, до которого доходит верхушка ртутного столбика в длинном колене манометра.

При отсчетах надо глядеть по линии, перпендикулярной к масштабу.

Результаты записывать в следующую таблицу:

№ опыта	а) Поверхность воды	б) Ртуть в коротком колене	в) Ртуть в длинном колене	г) Глубина в mm	д) Давление в mm ртутного столба	е) Отношение глубины к давлению
1						
2						
...						
					Среднее	

4) Вычислить:

г) на какой глубине под поверхностью воды находится верхушка ртутного столбика в коротком колене, и

д) как велико здесь давление воды (выражать давление в миллиметрах ртутного столба).

Записать полученные результаты в таблицу.

5) Уменьшить глубину погружения манометра, примерно, на десиметр; удерживая его неподвижно в вертикальном положении, повторить те же определения, как и в первом опыте; сделать те же расчеты и внести результаты в таблицу.

6) Продолжать так далее; последний опыт сделать на глубине от 15 до 10 cm.

7) Высчитать для каждого опыта отношение глубины к давлению. Что можно сказать про это отношение? Какой физический смысл имеет оно? Какая зависимость существует между давлением жидкости и глубиной?

8) Не оправдывается ли нашими опытами следующий закон: если нижняя часть сообщающихся сосудов наполнена более тяжелой жидкостью, а на поверхность этой жидкости в одном из сосудов налита другая жидкость, более легкая, не смешивающаяся с первой, то высоты жидкостей, отсчитанные от поверхности их соприкосновения, обратно пропорциональны их плотностям. Доказать этот закон теоретически, пользуясь рисунком 104.

Рис. 104. Сообщающиеся сосуды. Внизу более тяжелая жидкость BAE, наверху более легкая FB.

9) Изобразить результаты опытов графически, откладывая глубины на горизонтальной оси, давления — на вертикальной. Какой линией изображается найденная зависимость? Провести эту линию.

10) Из графика найти, какое давление имеется на глубинах 13, 46 и 84 cm под водой. Какое давление было бы в ртути на тех же глубинах?

11) Наполнив широкую трубку керосином вместо воды, повторить те же опыты и расчеты, внося записи в другую таблицу.

12) Найти среднее значение отношения глубины к давлению для воды и такое же среднее значение для керосина. Разделив первое среднее на второе, узнаем плотность керосина (почему?).

§ 147. Закон Архимеда состоит в следующем: **на всякое погруженное или плавающее тело жидкость действует силою, направленною вертикально вверх и равною силе веса жидкости, вытесняемой телом.**

Вот как доказывается этот закон рассуждением. Выделим мысленно внутри покоящейся жидкости некоторую часть S (рис. 105). Эта часть притягивается землей, однако же не падает; стало быть, сила веса ее как раз *уравновешивается* другою силой—силою гидростатического давления. Если бы мы *вместо жидкости, заключающейся в объеме S, подставили какое угодно тело,* имеющее точно тот же объем, то гидростатическое давление в остальной среде ни в чем бы не изменилось, и, значит, на тело S попрежнему действовала бы сила, равная силе веса жидкости в объеме S и направленная кверху [1]).

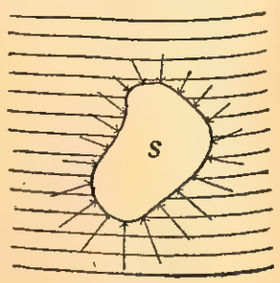

Рис. 105.

[1]) Так же доказывается закон в случае, если бы часть S сверху ограничивалась участком свободной поверхности жидкости (что соответствует телу плавающему).

Легко доказать закон Архимеда и опытом. Возьмем какое-нибудь довольно тяжелое тело (напр., кирпич), объем которого известен; пусть этот объем равен a куб. десиметрам. Привяжем тело с помощью тонкой проволочки к крючку пружинного безмена и свесим; положим, вес его — b килограммов. Погрузим тело в воду и снова свесим: безмен покажет только (b — a) килограммов, как будто тело „потеряло в весе“ a kg.

Для тел плавающих закон доказывается так: к крючку безмена прицепляется ведерко, совершенно наполненное водой; замечают показание безмена. Пускают плавать на воде кусок дерева; показание безмена при этом не изменяется.

Замечание. Понятно, что тело плавает на поверхности жидкости, если его вес меньше веса вытесняемой им жидкости; если же вес тела больше, чем вес вытесняемой жидкости, тело тонет.

§ 148. Применение закона Архимеда.—1) Плавание судов (и других пловучих приспособлений) основано на том, что вес воды, вытесняемой (смещаемой) судном, или так называемое *водосмещение*, равняется весу судна. Различают водосмещение при полной нагрузке и водосмещение спусковое, которое равняется весу корпуса корабля без машины, котлов, брони и пр.

2) На законе плавания тел основано устройство **ареометра** [1])— прибора для быстрого определения плотности жидкостей. Ареометр представляет собою запаянный стеклянный сосуд, нагруженный на своем нижнем конце ртутью или дробью (чтобы он плавал вертикально), а на верхнем конце имеющий цилиндрическую трубку, в которую вставлена бумажка с делениями. Эти деления показывают плотность той жидкости, в которой ареометр погружается до данной черты; иногда, как в ареометре Бомé, они имеют условное значение.

3) Если в жидком теле различные части имеют неодинаковую плотность (как это бывает при неравномерном нагревании жидкости), то части менее плотные стремятся кверху, а их место занимают более плотные массы. Подобное явление имеет место и в газах.

4) Пользуясь законом Архимеда, можно определять плотность тел. Произведем определение плотности твердого тела, более тяжелого, чем вода.

§ 149. Лабораторная работа № 16. — *Гидростатическим взвешиванием определить плотность твердого тела.*

Необходимые предметы: 1) весы с разновесками; 2) деревянная скамеечка (рис. 106); 3) стакан; 4) вода; 5) тело, плотность которого определяется (напр., кусок металла весом около 150 g); 6) нитка; 7) фильтровальная бумага.

Способ выполнения. — 1) К крючку, имеющемуся на конце левого плеча коромысла, привязать ниткой испытуемое тело на такой высоте, чтобы **при горизонтальном положении коромысла тело**

[1]) От греческих слов araiós = *редкий*, metró = *мерю*.

приходилось внутри (пустого) стакана, поставленного на скамейку (см. рис. 106).

Рис. 106.

2) Убрав стакан и скамейку, определить вес тела в воздухе. Затем переложить разновески в ящик.

3) Поставить скамейку над левой чашкой весов. На нее поставить стакан и опустить туда тело. Налить в стакан столько воды, чтобы при горизонтальном положении коромысла тело со всех сторон было окружено водою.

NB. *Не проливать воды на чашки весов.*

4) Свесить тело в воде.

NB. Скамейка не должна касаться весов, а тело не должно касаться стакана.

5) Вычислить потерю веса в воде. Как велик объем тела?

6) Вычислить плотность тела.

Вопросы. 1) Как можно гидростатическим взвешиванием определить плотность жидкости?

2) Как определить гидростатическим взвешиванием (в воде) плотность тела, более легкого, чем вода?

§ 150. Отступления от законов гидростатики [1].—Иногда можно бывает заметить отступления от законов, изложенных в этой главе.

Так, свободная поверхность жидкости у краев сосуда бывает не плоской, а выпуклой или вогнутой; если из двух сообщающихся сосудов один будет широкий, а другой будет представлять собой узкую трубку, то уровни жидкости в таких сосудах будут неодинаковы: можно заставить стальную иголку плавать на воде, хотя сталь почти в 8 раз плотнее воды.

Эти отступления объясняются тем, что законы гидростатики не принимают во внимание так называемых *сил сцепления*.

§ 151. Силы сцепления. Силы поверхностного натяжения.—Силы сцепления действуют между мельчайшими частицами вещества, стремясь сблизить их или сохранить данное размещение их. Всего заметнее силы сцепления в твердых телах: напр., чтобы разорвать проволоку и таким образом преодолеть сцепление частиц, мы должны приложить значительное усилие. Такие явления, как склеивание, спайка, сваривание, основаны на сцеплении частиц. В жидкостях силы сцепления слабы, поэтому-то жидкость так легко поддается разделению на части и перемешиванию. Но и здесь силы сцепления проявляют себя тем, что всякая жидкость стремится принять такую форму, при которой все частицы ее были бы как можно ближе друг к другу, т.-е. форму шара. Обыкновенно этому мешает сила тяжести, которою жидкость, так сказать, расплющивается; но если масса жидкости невелика, то сила тяжести не играет большой роли, и тогда жидкость действительно принимает шарообразную форму (капли дождя, капли ртути и т. п.). Однако и у больших масс жидкости можно бывает видеть след такого стремления: напр., поверхность ртути в стеклянном сосуде бывает выпукла у краев сосуда (что особенно заметно в стеклянных трубках, где поверхность ртути имеет форму шапочки, называемую *выпуклым мениском* [1]); эта форма получается потому, что ртуть не прилипает к стеклу, не „смачивает“ его. Вода, наоборот, смачивает стекло, т.-е. частицы воды сильнее притягиваются к стеклу, чем друг к другу; поэтому у краев стеклянного сосуда с водой образуется возвышение (рис. 13а), а в неширокой стеклянной трубке поверхность воды имеет форму *вогнутого мениска* (рис. 112).

[1]) Гидростатика = *учение о равновесии жидкостей* (от греч. слов hýdor = *вода*, statikē = *учение о равновесии*).

Стремление частиц жидкости соединиться друг с другом как можно теснее — приводит к тому, что жидкость, при данном объеме, стремится иметь наименьшую поверхность. В тонком поверхностном слое жидкости действуют силы, сопротивляющиеся всякому растяжению этого слоя, как будто бы жидкость была обтянута упругой кожицей (вроде резиновой). Этим объясняется плаванье иголки на воде [2]): под иголкой образуется углубление в виде широкого желобка; изогнутая часть поверхности жидкости, стремясь выпрямиться, действует на иголку снизу вверх с силою, уравновешивающею вес иголки; поэтому иголка не падает.

Если один из стеклянных сообщающихся сосудов—широкий, а другой представляет собою капилярную [3]) трубку, с диаметром канала в миллиметр или меньше, и если в сосудах — вода, то в „капиляре“ вода будет стоять значительно выше, чем в широком сосуде (и тем выше, чем уже капиляра). Это — оттого, что в капилярной трубке поверхность воды представляет собою вогнутый мениск; стремясь выпрямиться, эта поверхность тянет кверху столбик воды.

Капилярным поднятием смачивающей жидкости объясняются многие явления, например, поднятие масла и керосина в светильнях ламп, почвенной сырости—в пористых кирпичных стенах; по этой же причине тряпка вбирает в себя пролитую воду, промокательная бумага впитывает чернила и т. д. Когда спаивают две металлические поверхности, то важно, чтобы они были тщательно пригнаны друг к другу: тогда расплавленный припой всасывается в узкое пространство между ними, вследствие капилярности.

Если бы в сообщающихся стеклянных трубках, из которых одна — капилярная, содержалась ртуть, то уровень ртути в капиляре был бы ниже, чем в широкой трубке: это — оттого, что выпуклый мениск, стремясь выпрямиться, давит на находящийся под ним жидкий столбик.

---

[1]) Греч. слово meniskos означает тело лунообразной формы.

[2]) Для успеха опыта иголку надо предварительно провести между пальцами, чтобы она покрылась тонким слоем жира (жир не смачивается водой). А если поверхность иголки будет чиста, то вода при соприкосновении с ней немедленно покроет ее.

[3]) От лат. capillus = *волос*; бывают трубки с каналом тоньше волоса.

ГЛАВА XIII.

Жидкости в движении.

§ 152. Расчет водяной силовой установки.— Техническое использование механической энергии воды совершается при помощи водяных двигателей—колес и турбин[1]). Не останавливаясь на их устройстве (которое может быть весьма разнообразным), сделаем расчет простенькой „гидротехнической“ установки.

Пусть показанный на рис. 107 в разрезе и в плане участок реки имеет длину 9.1 km, при уклоне в 0.08%. В начале участка предполагается построить плотину, которая поднимет воду в русле на 0.7 m; непосредственно перед плотиной должен начинаться горизонтальный канал (который может быть проложен

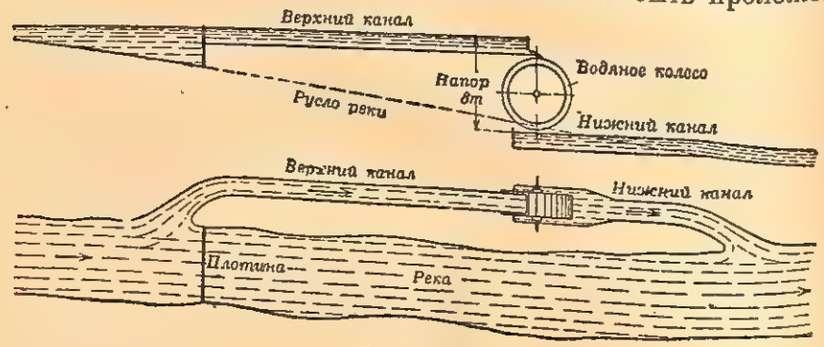

Рис. 107.

выше уровня земли), так наз. верхний канал. В некотором месте он прерывается, и здесь должен начинаться другой горизонтальный канал, нижний, соединяющийся с концом данного участка реки. Благодаря такому устройству, в месте встречи обоих каналов получится напор в $0.7 + 9100 \times 0.0008 = 8$ m. Здесь должно быть поставлено соответствующих размеров „наливное“ водяное колесо, приводимое в движение тяжестью воды, выливающейся из верхнего канала. От колеса требуется мощность в 140 kW для приведения в движение маленькой фабрики, имеющей 8 часов ночного перерыва. Сколько воды должен давать канал в секунду?

Искомое количество воды в куб. метрах назовем x. Вес этой воды будет 1000x kg, потенциальная энергия ее, пока она находится в верхнем канале, 8000x kgm; в течение суток верхний канал может дать $8000x \times 24 \times 3600$ kgm потенциальной энергии. Так как эту энергию предстоит истратить в течение 16 часов, то в каждую секунду можно тратить $\frac{8000x \times 24 \times 3600}{16 \times 3600} = 12000x$ kgm,

[1]) Водяная турбина представляет собою, в сущности, усовершенствованное колесо, вращающееся с большим числом оборотов в минуту.

что соответствует мощности $\frac{12\,000x}{75} = 160x$ HP, или $160x \times 0.736 = 118x$ kW. Полагая коефициент полезного действия наливного колеса равным 70%, найдем получаемую от него мощность $118x \times 0.7 = 83x$ kW. Наконец, из уравнения $83x = 140$ определяем $x = 1.7$ m³ в секунду.

Применение водяного колеса имеет ту невыгоду, что колесо вращается слишком медленно: его энергией нельзя воспользоваться для приведения в движение динамомашины, которая должна делать гораздо большее число оборотов в минуту. Поэтому в тех случаях, когда энергию воды желают превращать в электрическую, устраивают вместо водяного колеса турбину, дающую быстрое вращение. Турбина ставится на уровне нижнего канала; вода к ней проводится из верхнего канала через круто спускающуюся трубу.

Выгодность гидротехнической установки, конечно, повышается, если на реке имеются стремнины, пороги или водопады.

§ 153. Течение воды по трубам.—Положим, что вода может вытекать из резервуара по трубе AD (рис. 108), к которой в разных местах припаяны манометрические трубки E, F, G, H. Если отдаленный конец трубы заперт, и движения еще нет, то в трубках вода будет стоять на том же уровне, что и в резервуаре. Рассмотрим теперь, что будет, если трубу открыли, и течение установилось. Тогда количество воды, протекающее в единицу времени через каждое сечение трубы AD, будет одно и то же (если бы этого не было, то в одних местах вода скоплялась бы все больше и больше, в других — образовывался бы недостаток, — что противоречит понятию об установившемся течении). Мы представляем себе сечение трубы в одних местах (A, C) суженным, в других (B) расширенным. В таком случае понятно, что через суженные места вода должна двигаться быстрее, через расширенные — медленнее. Опыт показывает, что при этом в манометрических трубках уровни будут, во-первых, ниже, чем в резервуаре, а во-вторых, они будут разные — I, K, L, M: чем быстрее течение в каком-нибудь месте, тем меньшее давление будет здесь производить жидкость. Такое пониженное давление движущейся жидкости называется **гидродинамическим**[1]).

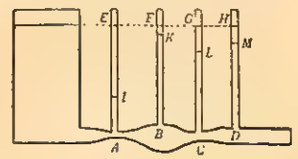

Рис. 108. Схема водопровода.

Мы можем теперь понять явления, замечаемые в домах, где проведена вода городского водопровода. Устройство водопроводной сети подобно рис. 108. Посредством насосов, или собирая воду на более возвышенной местности, наполняют „водонапорную башню“, служащую резервуаром; уровень воды в ней должен быть выше всех домов города. AD есть главная труба. Ее конец обыкновенно опять присоединяется к A, так чтобы получилось

[1]) От греч. слов hýdor = *вода*, dýnamis = *сила*.

замкнутое кольцо из труб: тогда каждый дом будет получать воду с обоих концов, и если в каком-нибудь месте труба попортится или будет заперта для починки, то приток воды не прекратится. E, F, G, H суть трубы, проводящие воду в дома. Когда все разборные краны закрыты (как это почти исполняется по ночам), вода стоит везде на самом высоком уровне. Когда же по пути берется много воды, то „напор“ в ответвлениях понижается, так что вода может и не доходить до верхних этажей. Случается, что в верхнем этаже из открытого крана не только не течет вода, но даже кран начинает засасывать воздух (т.-е. в нем давление меньше атмосферного): это значит, что внизу, на той же трубе, открыли вполне кран. Краны делаются винтовыми, чтобы нельзя было остановить струю очень скоро, так как быстрая остановка текущей воды сопровождается ударом, который очень вреден для прочности сети. Если воду выпускают свободно на воздух, как из поливного рукава, то частицы воды движутся, как всякое брошенное тело. Если струя направлена вверх, она поднимается тем выше, чем больше начальная скорость[1]. Поэтому, когда хотят получить высоко бьющую струю, то на конец рукава надевают суживающийся „брандспойт“: в суженном месте скорость больше.

§ 154. Струйный насос.—На действии гидродинамического давления основано устройство струйных насосов. Опишем насос Томсона, служащий для выкачивания воды из подвалов в городах, где есть водопровод. Вода из водопровода протекает по трубе FG (рис. 109), внутри которой, в суженном месте, имеется сопло E; здесь развивается большая скорость, поэтому давление падает настолько, что засасывается вода из H; эта вода затем смешивается с водою, текущей по G. Подобные насосы, действующие водой или ртутью, употребляются также для высасывания воздуха из какого-нибудь замкнутого пространства.

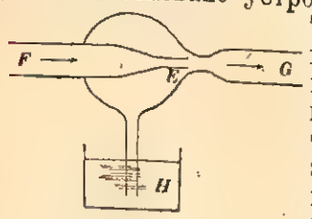

Рис. 109. Струйный насос.

---

[1]) Тело массы m, брошенное кверху со скоростью v, имеет запас кинетической энергии, $\frac{1}{2}mv^2$. В наивысшей точке полета, на высоте h, вся эта кинетическая энергия превращается в потенциальную mgh (g—ускорение тяжести). Имеем уравнение $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$, откуда $h = \frac{v^2}{2g}$.

ГЛАВА XIV.

Газы.

§ 155. Свойства газов. — Во многих отношениях газы (а также и пары, которые в сущности—те же газы) сходны с жидкостями. Они имеют вес; их частицы еще легче скользят одна около другой, чем частицы жидкостей; они обнаруживают гидростатическое и гидродинамическое давление; для покоящихся газов справедлив закон Паскаля, а также закон Архимеда.

Отличия газов от жидкостей заключаются в следующем: у газов нет поверхностного натяжения, поэтому они не образуют капель, а распространяются по всему предоставленному им пространству; они обыкновенно имеют малую плотность; они гораздо более сжимаемы, чем жидкости.

§ 156. Лабораторная работа № 17. — *Определить плотность воздуха.*

Необходимые предметы: 1) стеклянный тонкостенный шар, емкостью около 400 cm³, с трубкой, на которую насажен кусочек резиновой трубки, запираемый зажимом; 2) весы с разновесками; 3) горелка (газовая или спиртовая); 4) вода в глубоком сосуде (напр., в ведре); 5) сухая тряпка.

Способ выполнения. 1) Свесить шар с резиновой трубкой, зажимом и воздухом, находящимся внутри его.

2) Открыв зажим, нагревать шар в течение нескольких минут на пламени горелки, поворачивая его при этом; чтобы он прогрелся равномерно. Остается ли в шаре весь воздух, бывший там раньше?

3) Закрыть зажим и снять шар с пламени. Дать ему остыть.

4) Когда шар уже не будет горяч, свесить его.

5) Определить разность в весе шара до нагрева и после его. Чем объяснить эту разность?

6) Погрузив резиновую трубку в воду, открыть зажим.

7) Держа шар таким образом, чтобы уровни воды в шаре и в ведре совпали, закрыть зажим.

8) Вынуть шар из воды, тщательно осушить поверхность его и удалить воду из открытого конца резиновой трубки.

9) Свесить шар с вошедшей в него водой.

10) Как велик объем воздуха, вытесненного из шара при нагревании?

11) Вычислить плотность воздуха.

12) Записать показание термометра в комнате, где производился опыт, и показание барометра.

Вопросы: 1) Зачем нужно, чтобы уровни воды в шаре и в ведре совпадали во время закрытия зажима?

2) Сколько весит 1 литр, 1 куб. метр воздуха?

§ 157. Плотность газов. Упругость газов. — Если какой-нибудь газ, заключенный в оболочку, находится в равновесии

под действием тяжести, то гидростатическое давление его, по § 141, различно на разных уровнях. Но газы обыкновенно имеют малую плотность: напр., плотность воздуха при 0° и при нормальном барометрическом давлении равна $\frac{1}{770}$ (или 0.0013) $\frac{g}{cm^3}$ [1]). Таким образом, если какая-нибудь трубка, наполненная воздухом, имеет высоту в 1 метр, то давление внизу ее отличается от давления вверху на величину, измеряемую столбом воздуха в 1 метр или столбом воды в $\frac{1}{770}$ m = 1.3 mm. Эта величина настолько мала, что ею пренебрегают, допуская, что давление газа одинаково вверху и внизу. Давление это иначе называют **упругостью газа**. Численно выражают упругость газов или в $\frac{kg^*}{cm^2}$, или в миллиметрах ртутного столба (при чем слова „ртутного столба" часто пропускаются), или же еще в особых единицах — „атмосферах" (§ 160).

§ 158. Металлический манометр.—Упругость газа в каком-нибудь вместилище может быть на практике измерена с помощью различных манометров. Кроме открытого манометра, о котором была речь в § 145, опишем устройство металлического манометра. Один конец A сплющенной металлической трубки ABC (рис. 110) открыт и присоединяется к вместилищу M, а другой конец C, закрытый, снабжен стрелкой, перемещающейся по скале EF. Когда давление внутри трубки увеличивается, трубка раскручивается, стрелка идет к F, и наоборот. Прибор употребляется для измерения давления воздуха в автомобильных шинах, давления в паровом котле.

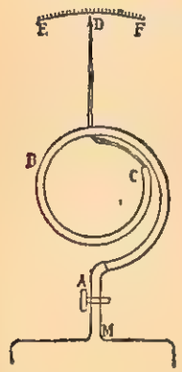

Рис. 110. Металлический манометр.

§ 159. Лабораторная работа № 18:— *Определить плотность жидкости гидрометром* (рис. 111).

Гидрометр состоит из двухколенной стеклянной трубки A_1BA_2, подвешенной к стойке, двух масштабов, резиновой трубки S, зажима Q, мундштука M. Кроме того, нужны две чашки G_1 и G_2 с небольшими количествами воды и испытуемой жидкости (напр., раствора соли).

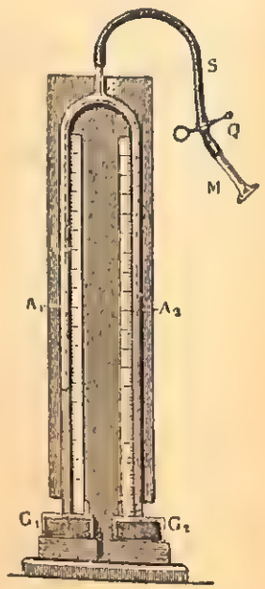

Рис. 111. Гидрометр.

[1]) Отсюда легко высчитать, что литр воздуха при указанных условиях весит 1.3 g.

Способ выполнения.—1) Открыть зажим; высосав несколько воздуху через мундштук так, чтобы жидкость поднялась в обеих трубках на достаточную высоту, закрыть зажим снова. NB. *Надо быть осторожным, чтобы жидкости не смешались и не попали в рот.*

Вопросы. Одинаковы ли давления на поверхности жидкостей в той и другой чашечке? Одинаковы ли давления на поверхности жидкостей в той и другой трубке?

2) Отсчитать в миллиметрах уровни n_1 и n_2 обеих жидкостей в чашечках, а также уровни их N_1 и N_2 в трубках, считая за уровень жидкости касательную ab к ее вогнутой границе (рис. 112).

3) *Доказать*, что если h_1 и h_2 — высоты столбов воды и испытуемой жидкости, то плотность этой последней равна $\frac{h_1}{h_2}$.

Рис. 112.

4) Проделать опыт 5 раз, при разной высоте столбов. Каждый раз высчитывать отношение $\frac{h_1}{h_2}$. Из пяти полученных отношений взять среднее [1]).

5) Если плотность испытуемой жидкости ранее определялась другим способом, то сравнить полученный результат с прежним результатом.

Вопросы: 1) Нельзя ли рассматривать трубку с водою, как манометр?

2) Насколько отличается в первом из опытов давление воздуха в приборе от давления наружного воздуха?

3) Что нужно знать, чтобы быть в состоянии определить упругость воздуха в гидрометре?

4) При наличности достаточно высокого прибора, какую высоту имел бы водяной столб, если бы воздух был вовсе удален из прибора?

Схема записи.

№ опыта	n_1	n_2	N_1	N_2	$h = N_1 - n_1$	$h_2 = N_2 - n_2$	$\frac{h_1}{h_2}$.
1							
2							
...							
						Среднее	

[1]) Если уровень жидкостей в чашечках отсчитывается с трудом и не точно, то можно обойтись без отсчета его, при помощи следующей уловки. Пусть в одном опыте отсчеты верхних оснований столбов по масштабу будут m_1 и m_2, а в другом M_1 и M_2. Тогда частное $(M_1 - m_1) : (M_2 - m_2)$ дает искомую плотность.

§ 160. Опыт Торичелли. Барометр. — Возьмем длинную стеклянную трубку, закрытую с одного конца; наполним ее ртутью, наблюдая, чтобы в трубке не оставался воздух; закроем открытый конец пальцем и, опрокинув трубку, опустим нижний конец в чашку с ртутью. Затем отнимем палец (рис. 113). В трубке будет стоять столб ртути около $^3/_4$ метра высотой; выше столба будет пустое пространство — „Торичеллиева пустота".

На поверхность ртути в чашке действует атмосферное давление; следовательно, и внутри трубки на том же уровне *a* господствует давление, равное атмосферному. Это давление создается здесь тяжестью ртутного столба *ab*; значит, **давление атмосферы равно давлению ртутного столба *ab*.** Иначе сказать: **атмосферное давление измеряется высотою ртутного столба *ab*.**

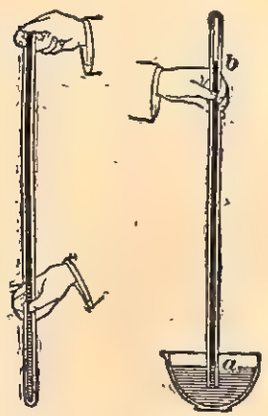

Рис. 113. Опыт Торичелли.

Если к прибору Торичелли присоединить масштаб, позволяющий измерить высоту ртутного столба, то получится простейший измеритель атмосферного давления, или **барометр** [1]).

С помощью барометра легко заметить, что величина атмосферного давления в данном месте постоянно изменяется, колеблясь около некоторой средней величины. Средней или **„нормальной" величиной атмосферного давления на уровне моря считают 760 mm ртутного столба.**

Рассчитаем, сколько это составляет килограммов на кв. сантиметр. Для этого достаточно определить в kg вес ртутного столба, сечением в 1 cm², высотою в 76 cm. Вес такого столба в граммах будет $1\ \text{cm}^2 \times 76\ \text{cm} \times 13.6\ \frac{g}{\text{cm}^3} = 1033\ g$. Итак, **нормальное атмосферное давление на уровне моря** равно $1033\ \frac{\text{kg}^*}{\text{cm}^2}$, — **немного больше, чем** $1\ \frac{\text{kg}^*}{\text{cm}^2}$.

Давление, измеряемое 760 mm ртутного столба и равное $1.033\ \frac{\text{kg}^*}{\text{cm}^2}$, в физике часто принимают за особую единицу давления. Эту единицу называют **нормальной атмосферой.** В технике же называют **атмосферой** на 3.3% меньшую величину, а именно $1\ \frac{\text{kg}^*}{\text{cm}^2}$; ее сокращенно обозначают **at.**

Задача. Паровой котел имеет форму цилиндра с диаметром в 1 m. Давление пара в котле равно 8 at. Найти величину силы, стремящейся выдавить наружу круглое днище котла.

---

[1]) От греческих слов: báros = *тяжесть*, metró = *мерю*.

Реш. Снаружи на поверхность котла действует (круглым счетом) 1 at, в направлении, противоположном давлению пара. Сила, стремящаяся выдавить днище, будет обусловлена остальными 7 атмосферами; она равна $7\frac{\text{kg}^*}{\text{cm}^2} \times {}^{22}/_7 \times (50\ \text{cm})^2 = 55\ \text{t}^*$. (Это примерно равняется силе веса четырех полностью нагруженных товарных вагонов.)

§ 161. Металлический барометр. — Очень удобен и поэтому широко распространен „анероидный" [1]) или „металлический" барометр (рис. 114). Главная часть его — металлическая коробочка К с волнистыми, очень тонкими основаниями, из которой выкачан воздух. Когда давление воздуха увеличивается, основания коробочки вдавливаются; когда давление уменьшается, они выпячиваются. Эти движения с помощью рычажков l и mt передаются цепочке s, навернутой на ось стрелки. Натяжение цепочки поддерживается пружиной. Стрелка ходит по скале, которая разделена по сравнению с ртутным барометром; таким образом металлический барометр дает свои показания в миллиметрах ртутного столба (а старые инструменты—в дюймах).

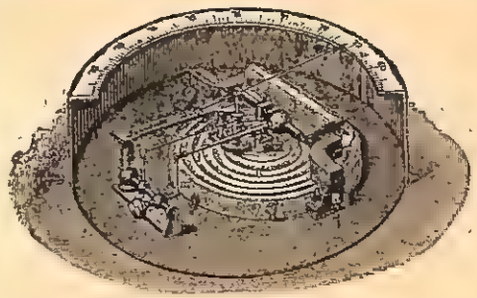
Рис. 114. Анероидный барометр.

Перед тем, как отсчитать металлический барометр, слегка постукивают по его стеклу пальцем или карандашом, так как движение стрелки обычно задерживается трением в механической передаче.

§ 162. Применение барометра. — Барометром пользуются чаще всего, как погодоуказателем. Это основано на том, что, напр., в наших краях значительное падение барометрического давления часто (хотя и не всегда) предшествует дождливому времени, а повышение давления — прекращению дождей.

Металлический барометр служит удобным прибором для измерения высоты места, напр., в путешествиях, при поднятии на горы; в воздухоплавании употребляются под названием *альтиметров* [2]) барометры со специально устроенной скалой, на которой прямо отсчитывается высота поднятия. С помощью металлического барометра можно заметить разность давления воздуха уже между верхним и нижним этажом высокого дома.

Легко рассчитать (на манер того, как в § 157), что при поднятии на каждые 10 m, начиная от берега моря, барометр будет „падать" почти на 1 mm; но чем выше мы поднимаемся,

---

[1]) От греч. слов an — отрицательная частица, aér = *воздух*; анероид = *безвоздушный*.

[2]) Лат. altus значит *высокий*.

тем более медленным делается его падение (так как плотность воздуха становится меньше). Точная зависимость барометрического давления от высоты выражается довольно сложной формулой.

§ 163. Приборы, действующие атмосферным давлением. — 1) **Сифоном** [1]) называется труба, служащая для переливания жидкости из выше лежащего резервуара в более низкое место и расположенная так, что часть ее лежит выше обоих резервуаров.

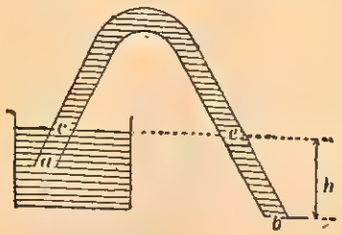

Рис. 115. Действие сифона.

Пусть один конец *a* сифона (рис. 115) опущен в сосуд, который надо опорожнить, а другой конец *b* помещен ниже уровня жидкости в сосуде. Для действия сифона он должен быть наполнен жидкостью. Рассмотрим, какое давление господствует при этом в разных частях сифона, предполагая, что конец *b* еще закрыт.

В точках *c* и *e*, лежащих на одном уровне с свободной поверхностью жидкости в сосуде, давление, по закону сообщающихся сосудов, будет равно давлению атмосферному; давление же в точке *b* будет *больше* атмосферного на величину, измеряемую высотою *h* жидкого столба. Поэтому, если откроем конец *b*, то жидкость польется отсюда; и так как, при не особенно большой высоте сифона, в нем не может образоваться пустого пространства (этому мешает атмосферное давление), то течение будет непрерывно продолжаться.

Сифон применяется при устройстве открытых водопроводов для того, чтобы дать возможность воде перелиться через встречающийся на пути холм; также — при устройстве плотин, для выпуска излишней воды из пруда.

На рис. 116 изображена модель сифона, верхнее колено которого находится внутри сосуда, наполняемого приходящей жидкостью, а нижнее выведено через дно сосуда наружу. Такой сифон начинает действовать, когда уровень жидкости в сосуде дойдет до верхушки сифона; тогда он сразу опорожняет сосуд. Подобный „перемежающийся сифон“ применяется при устройстве уборных.

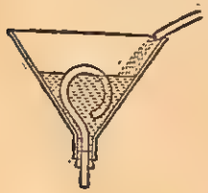
Рис. 116. Перемежающийся сифон

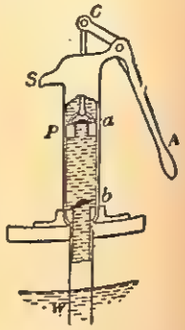

Рис. 117. Всасывающий насос.

2) Устройство **всасывающего водяного насоса** показано на рис. 117. Поршень P здесь „проходной“, т.-е. он имеет отверстие, которое

[1]) Греческое слово siphon.

закрывается клапаном *a*, открывающимся кверху. Когда поршень действием рычага *AC* движется вверх, клапан *a* закрыт давлением воздуха и находящейся над поршнем воды, клапан же *b*, находящийся внизу насосного цилиндра, открывается действием стремящейся снизу воды, которую гонит сюда атмосферное давление, приложенное к поверхности воды W. При движении поршня вниз *b* запирается, но открывается *a* и пропускает воду в пространство над поршнем. Вода вытекает из отверстия *S*.

3) **Нагнетательный водяной насос** имеет „дисковой“ (рис. 118) или „ныряльный“ поршень *P*, при движении которого вниз вода из цилиндра нагнетается в боковую трубу *HS* через клапан *a*. Подобный насос входит в состав гидравлического пресса (рис. 97).

Давление атмосферы может уравновесить столб воды в 10 m; поэтому если расстояние между водой W и поршнем больше, чем 10 m, то насосы не смогут действовать [1]). Но высоту трубы над поршнем можно сделать какую угодно.

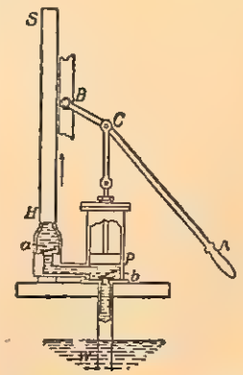

Рис. 118. Нагнетательный насос.

§ 164. Расчет работы насоса. — Положим, что необходимо в течение секунды сообщить напор H метров Q куб. метрам жидкости, плотность которой есть d $\left(\frac{g}{cm^3} \text{ или } \frac{t}{m^3}\right)$. Для этого придется затратить количество полезной работы, равное 1000 QHd килограммметрам; соответствующая *полезная* мощность будет $\frac{1000\ QHd}{75} = 13.3\ QHd$ лош. сил. Мощность же, затрачиваемая в действительности, будет больше; она будет равна $N = 13.3\ QHd : \eta$ лош. сил, где η — коефициент полезного действия насоса.

Задача. Сколько часов надобно работать человеку, чтобы поднять 2 m^3 воды на высоту 10 m? Мощность человека при работе рычагом считать в 0.1 HP; η положить равным 0.6.

Реш. Подставляя данные в формулу, имеем $0.1 = 13.3\ Q \times 10 : 0.6$, откуда Q (т.-е. количество, поднимаемое в 1 sec) $= 6 : 13300\ m^3$. В час будет поднято $\frac{6 \times 3600}{13300} = \frac{216}{133}\ m^3$. Для поднятия 2 m^3 потребуется $1^1/_4$ часа.

§ 165. Аэростат. — Тело, вес которого меньше, чем вес вытесняемого им воздуха, по закону Архимеда поднимается в воздухе. На этом основано летание на апаратах „легче воздуха“, или так называемых аэростатах [2]).

[1]) На практике это расстояние берется не более 6 — 8 m, вследствие того, что вода выделяет растворенный в ней воздух и дает пары, чем уравновешивается часть атмосферного давления.

[2]) От греческих слов aér = *воздух*, statós = *стоящий*.

Если, напр., вес P аэростата с корзиной или „гондолой“ и принадлежностями — 4500 kg, и если аэростат смещает объем воздуха, равный 5000 m³, то разность между весом этого воздуха $5000 \times 1.3 = 6500$ kg и весом P, равная 2000 kg, называется его „полезной подъемной силой“.

§ 166. Лабораторная работа № 19. — *Исследовать зависимость между давлением и объемом воздуха.*

Необходимые предметы: 1) доска, употреблявшаяся в работе № 3, покрытая клетчатой бумагой, с крючком P и ямкой K (рис. 119) [1]); 2) стеклянная трубка *ab* (рис. 120) с одним закрытым концом, длиною до 1 m, с диаметром канала около $2^1/_2$ mm, толщиной стенок около 1 mm; она резиновыми кольцами прижата к деревянному или картонному масштабу с миллиметровыми делениями; к концу *a* масштаба привязана нитка; в трубке находится столбик воздуха *ab*, запертый ртутным столбиком *bc*, длина которого около 30 cm; 3) кусок клетчатой бумаги.

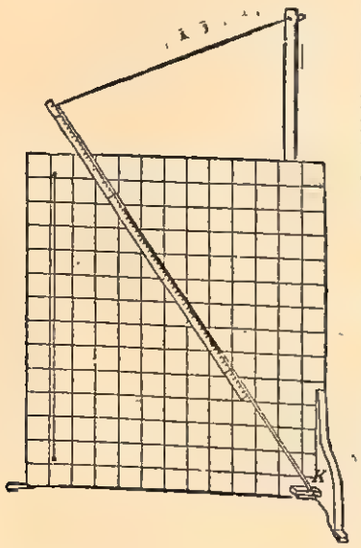

Рис. 119.

Способ выполнения. 1) Записать показание барометра (B mm).

2) Установить доску по отвесу.

3) Осторожно взяв трубку и держа ее горизонтально (вдоль одной из горизонталей доски), отсчитать по масштабу длину воздушного столба, заключенного в ней, в миллиметрах.

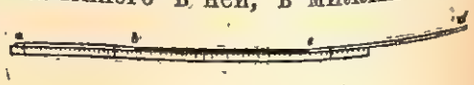

Рис. 120.

Полученным числом будет измеряться объем данной массы воздуха, в условных единицах.

NB. *Обращаться с трубкой очень осторожно, чтобы не разбить ртутный столбик. Не нагревать руками заключенного в ней воздуха.*

4) Как велико при этом давление p воздуха в трубке? Записывать значения v и p в таблицу, составленную так:

Объем воздуха v	Давление воздуха p (в mm ртутного столба)	Произведение vp

[1]) Вместо этой доски может служить лист бумаги с проведенными на нем взаимно перпендикулярными линиями, приколотый к стене так, чтобы одни линии были вертикальны, а другие — горизонтальны.

5) Расположить трубку вертикально, упирая ее *закрытым* концом в ямку K. Опять записать значение v; вычислить и записать значение p (оно равно B плюс длина столбика ртути).

6) Повторить то же, держа трубку вертикально, открытым концом вниз (p равно B минус длина ртутного столбика).

7) Сделать еще два отсчета при более или менее *наклонном* положении трубки, упирая ее открытым концом в K и придерживая ниткой, как показано на рис. 119 (здесь p равно B минус разность уровней ртути в трубке; эта разность отсчитывается по вертикальной линии).

8) Подобно этому сделать еще два отсчета при наклонных положениях трубки, закрытым концом вниз.

9) Высчитать значение vp и сравнить их между собою. Какая существует зависимость между давлением и объемом газа (при неизменной температуре)?

10) Выразить результаты опытов графически. На горизонтальной оси откладывать значения v, на вертикальной — значения p. Получится 6 точек, соответственно шести опытам. Провести плавную кривую возможно ближе к ним. Это будет дуга **гиперболы.**

11) Взять среднее из найденных значений vp (если какое-нибудь из них сильно отклоняется от всех других, то, значит, оно ошибочно; выкинуть его и ограничиться остальными).

12) Как велик был бы объем v данной массы воздуха при давлении $p = 300$ mm? 100 mm? при $p = 760$ mm? 1000 mm? 1300 mm? Записать получаемые числа в таблицу.

13) Нанести полученные числа в виде точек на график. Соединить эти точки плавной кривой, включив сюда и прежнюю кривую.

§ 167. Закон Мариота (иначе называемый **законом Бойля**) состоит в том, что **для данной массы какого-нибудь газа, при неизменной температуре, объем обратно-пропорционален давлению.**

Алгебраически можно выразить это так:

$$vp = C,$$

где v — объем газа, p — давление. Произведение переменных величин v и p равно постоянной величине C (для данной массы газа и данной температуры) [1]).

Так как для тела данной массы объем обратно-пропорционален плотности, то иначе можно выразить закон Мариота так: **при неизменной температуре плотность газа прямо-пропорциональна его давлению.**

§ 168. Ливер. Воздушный колпак. — Закон Мариота поможет нам понять действие ряда приборов. Начнем с *ливера* [2]), служа-

[1]) Таким образом, если подвергнуть газ давлению в 10 раз большему, то объем его в 10 раз уменьшится: газам свойственна, как говорится, сильная *сжимаемость*. Наоборот, жидкости очень мало сжимаемы: если воду подвергнуть давлению в 12 000 $\frac{kg}{cm^2}$, то объем ее уменьшится только на одну пятую долю первоначального. Твердые тела еще менее сжимаемы, чем жидкости.

[2]) Англ. слово lever значит *подъем*.

щего для того, чтобы брать пробы вина из бочек. Это — трубка, имеющая небольшие отверстия вверху и внизу (рис. 121). Ее опускают в жидкость, затем закрывают пальцем верхнее отверстие и вынимают ливер из жидкости. Тогда из него выльется несколько капель жидкости, но вследствие этого увеличится объем воздуха, находящегося в верхней части ливера, и соответственно уменьшится давление этого воздуха, так что атмосферного давления, действующего снизу на жидкость в нижнем конце прибора, хватит, чтобы уравновесить давление заключенного в ливере воздуха плюс напор жидкости в нем: жидкость не будет выливаться, пока не отнимут палец.

Рис. 121. Ливер.

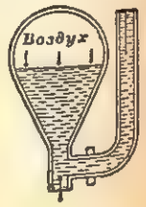

Рис. 122. Воздушный колпак.

Воздушный колпак (рис. 122) включается в трубопровод при сильном нагнетательном насосе для устранения разрушительно действующих ударов, которые вызываются переменным движением поршня взад и вперед. Вода, выгоняемая через клапан *a* (рис. 118), частью с силой входит в колпак, уменьшая объем находящегося здесь воздуха; при этом последний приобретает бо́льшую упругость; и когда во время обратного движения поршня приток воды прекращается, воздух в колпаке своим давлением продолжает гнать воду в трубку HS Таким образом получается гораздо большая плавность действия.

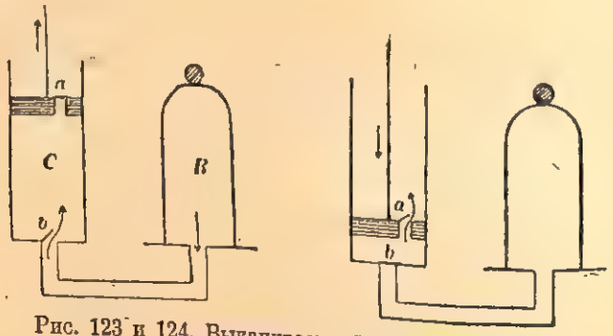

Рис. 123 и 124. Выкачивающий воздушный насос.

§ 169. Выкачивающий воздушный насос. — Существует очень много систем насосов, служащих для разрежения воздуха в каком-нибудь пространстве [1]). Мы опишем лишь самое простое устройство, подобное устройству всасывающего водяного насоса.

[1]) Есть насосы, доводящие разрежение до 0.0000002 mm ртутного столба. — Наибольшей простотой и дешевизной (делается чаще всего из стекла) отличается струйный насос, устраиваемый по схеме рис. 109. Его присоединяют к водопроводу, а боковую трубку сообщают с выкачиваемым пространством. Правда, он не дает большого разрежения, потому что в выкачиваемом пространстве остаются пары воды.

В цилиндре C (рис. 123) движется „проходной“ поршень с клапаном *a*, открывающимся наружу; этот поршень плотно прилегает к стенкам цилиндра благодаря смазке. На дне цилиндра находится другой клапан *b* (открывающийся, как и *a*, наружу); он закрывает и открывает трубку, соединяющую цилиндр насоса с выкачиваемым пространством R.

Когда поршень движется кверху (рис. 123), то воздух под ним занимает все больший объем, он „разрежается“; давление его, соответственно этому, уменьшается; и атмосферное давление, как более сильное, захлопывает клапан *a*. Что касается клапана *b*, то он открывается (так как давление воздуха в R превышает давление в цилиндре) и *пропускает часть воздуха из* R *в цилиндр*.

При движении поршня вниз (рис. 124) воздух под ним сгущается, и клапан *b*, испытывая сверху большее давление, чем снизу, захлопывается. При дальнейшем опускании поршня воздух в цилиндре продолжает сгущаться; когда *этот воздух сделается плотнее атмосферного*, тогда он своим давлением приподнимает клапан *a* и начинает *выходить наружу*.

С первого взгляда может показаться, что, при каждом ходе поршня вверх и вниз, из пространства R будет выгоняться наружу некоторое количество бывшего там воздуха. На самом деле это не так. При увеличивающемся разрежении воздуха наступит такая пора, когда воздух, наполняющий собою цилиндр при самом высоком положении поршня, будет сжат опускающимся поршнем в маленькое пространство между клапаном *a* и дном цилиндра (так называемое „вредное пространство“) и все-таки не сможет приподнять клапан *a*, так как его упругость не будет превышать упругости атмосферного воздуха. Тогда, сколько бы мы ни качали, клапаны уже не будут двигаться: мы достигли предельного разрежения.

Чем меньше вредное пространство, тем более совершенную „пустоту“ дает насос. В современных насосах нередко заполняют вредное пространство маслом; такие насосы зовутся „масляными“.

Понятно, что насосом можно откачивать не только воздух, но и другие газы или пары.

Выкачивающие насосы имеют много технических применений: 1) для откачивания из холодильников при паровых машинах проникающего туда воздуха и остатков пара вместе с водой; 2) в различных химических производствах (напр., в сахарном) — для быстрого уваривания и выпаривания сиропов и растворов; 3) для отсасывания вредных для здоровья газов, паров и пыли из мастерских; 4) для откачивания воздуха из лампочек накаливания, Рентгеновых и катодных трубок, и т. д.

§ 170. Сжимающие воздушные насосы служат для уплотнения воздуха или другого газа; более сильные машины этого рода называются *компресорами* [1]). Уплотненный (а след., обладающий и большею упругостью) воздух имеет множество техни-

[1]) От лат. comprimo = *сжимаю*.

ческих применений: в велосипедных и автомобильных шинах; в пневматических[1]) тормозах; в тревожной сигнализации, пневматической почте; для пускания движущихся подводных мин; далее, сжатым воздухом приводят в действие особо устроенные пневматические инструменты и машины, применяемые для клепки, для пробивки, сверления и развертки дыр, для обрубки листов и заклепочных головок, для чеканки швов, для очистки отливок и т. д. Компресорами пользуются еще: для нагнетания свежего воздуха взамен испорченного в тунели, в рудники, в помещения, где скопляется много людей; для накачивания воздуха в затонувшие корабли, чтобы заставить их всплыть на поверхность. Близкое к насосам устройство имеют токже *воздуходувные машины*, служащие для получения мощного потока воздуха, какой необходим бывает в железоделательном производстве для получения сильного жара в печах или для выжигания веществ, примешанных к железу.

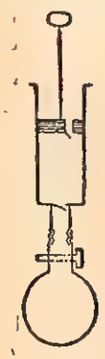

Рис. 125.

Схема простейшего нагнетательного насоса показана на рис. 125. Он отличается от выкачивающего насоса, описанного выше, только тем, что клапаны открываются в противоположную сторону. Внимательный читатель сам разберет его действие.

---

[1]) От греч. слова pneumatikós = *воздушный*.

Библиотека С.Ф.С.Р. Отд. Науч. Обслуж. 07 ИЮЛ 20

ОТДЕЛ ТРЕТИЙ.

Учение о теплоте.

ГЛАВА XV.

Расширение тел при нагревании.

§ 171. Температура. — Мы отличаем тела более нагретые от менее нагретых. **Температурой называется степень нагретости тела, указываемая особым прибором — термометром**[1]). Устройство обыкновенного термометра основано на свойстве тел увеличивать свой объем при нагревании и уменьшать его при охлаждении.

§ 172. Ртутный термометр. Основные точки. — Ртутный термометр состоит из закрытой капилярной стеклянной трубки с резервуаром на нижнем конце (рис. 126). Резервуар и часть трубки заполнены ртутью; выше ртути — пустота.

Термометрическая скала имеет две **основные точки:** одна из них называется **точкой таяния льда**, другая — **точкой кипения воды под давлением 760 mm.**

Для определения точки таяния льда помещают термометр в тающий чистый снег или мелко истолченный лед; самое низкое место, до которого дойдет оконечность ртутного столбика, отмечают чертой.

Для определения точки кипения воды помещают термометр в пространство, заполненное парами кипящей чистой воды, и замечают место, до которого при этом дойдет ртутный столбик. Но так как давление паров, окружающих термометр, только в исключительных случаях равняется 760 mm, то на основании показания барометра и при помощи особых таблиц определяют, где была бы оконечность ртутного столбика, если бы давление паров равнялось 760 mm[2]). Здесь и будет вторая основная точка скалы.

Рис. 126. Ртутный термометр.

---

[1]) От греч. слов thermós = *теплый*, metró = *мерю*.

[2]) С изменением давления, под которым кипит вода, изменяется и температура кипящей воды. Об этом будет сказано подробнее в §§ 203—204.

§ 173. Термометрическая скала Цельсия. — Расстояние между основными точками делится на 100 равных частей, и такие же части откладываются по обе стороны этого расстояния. Эти части называются **градусами**[1]). Точка таяния льда означается **нулем**, точка кипения воды — числом **100**. Соответственно этому занумеровываются прочие градусы. Градусы ниже нуля занумеровываются числами отрицательными[2]).

§ 174. Термометры с другими жидкостями. — При 39° ртуть замерзает, и описанный выше термометр перестает служить; поэтому нередко употребляются термометры, наполненные (подкрашенным) спиртом или другими жидкостями, не замерзающими при очень сильном холоде.

§ 175. Лабораторная работа № 19. — *Исследовать линейное расширение твердого тела.*

Необходимые предметы: 1) латунная или железная трубка *co* (рис. 127) длиною около метра, диаметром около 1 cm, с пропиленным на одном ее конце узким поперечным желобком *c*[3]); 2) кипятильник или просто колба с водой, запертая пробкой, через которую проходит стеклянная трубка, на тагане с куском медной сетки; 3) кусок резиновой трубки для соединения частей 1 и 2; 4) деревянная подставка B; к верхней грани ее прикреплена гладкая стеклянная пластинка; 5) деревянная подставка A; к ней прикреплена металлическая полоска с острым краем; 6) стеклянная трубочка *b* около 6 mm в диаметре, к которой сургучом приклеен легкий указатель *p* из соломинки, тонкого картона и т. п., длиною около 20 cm; 7) миллиметровый масштаб на стойке *s*; 8) горелка; 9) чашечка для стока воды; 10) метровый масштаб; 11) термометр (можно обойтись и без него, если в комнате имеется обыкновенный комнатный термометр); 12) винтовой калибр; если его нет, то — тонкая нитка.

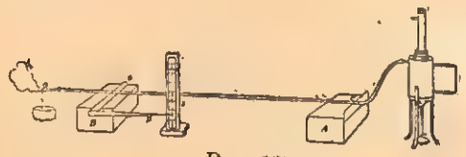

Рис. 127.

Способ выполнения. 1) Сделать установку, как показано на рис. 127, не зажигая пока горелку. Трубка поверхностью желобка *c* опирается об острый край полоски.

2) Вложить термометр в открытый конец *o* трубки и оставить его там минут на 5. Тем временем

3) измерить вдоль трубки *co* расстояние от желобка *c* до оси трубочки *b*. Назвать эту длину l_1.

4) Отсчитать показание термометра t_1. Если работающий не располагает особым термометром, то ограничиться тем, что записать показание комнатного термометра. Если термометр показывает градусы Реомюра, то не забыть перевести их в градусы Цельсия.

5) Отсчитать положение кончика указателя *p* на масштабе *s*, оценивая на-глаз десятые доли миллиметра. Назвать этот

[1]) Лат. слово grádus = *шаг, ступень.*

[2]) В житейском обиходе у нас употребляется еще скала Реомюра. Здесь точка таяния льда отмечена нулем, а точка кипения воды — числом 80. Поэтому 1° R (Реомюра) = 1¼° C (Цельсия).

[3]) Можно взять также стеклянную трубку; тогда придется конец *co* закрепить не подставкой A, а в зажиме штатива.

отсчет s_1. При отсчете смотреть на кончик указателя по линии, перпендикулярной к *s*.

6) Зажечь горелку под кипятильником. Почему поднимается указатель *p*? Ждать, пока из *o* не пойдет пар сильной струей, и пока указатель не перестанет подниматься. Тогда снова отсчитать положение указателя и назвать отсчет s_2.

7) Отсчитать показание термометра t_2, не вынимая его из трубки. Если термометра нет, просто принять $t_2 = 100°$.

8) Разобрать установку,

9) Измерить длину указателя от кончика до центра трубки b.

10) Измерить винтовым калибром три различных диаметра трубки b и взять из них среднее (желательна точность по крайней мере до 0.01 mm). Если калибра нет, намотать на трубку 10 или 20 оборотов тонкой нитки, один рядом с другим (при чем не слишком натягивать нить), отметить конечную точку намотки, потом измерить масштабом длину нити в сделанном числе оборотов и отсюда вычислить диаметр трубки.

11) На рис. 128 схематически показано передвижение трубки b и указателя p. В каждый данный момент b вращается около нижнего конца своего вертикального диаметра; в то время как верхний конец этого диаметра, повернувшись на некоторый угол, пройдет расстояние $l_2 - l_1$, указатель повернется на такой же угол и пройдет расстояние $s_2 - s_1$. Из подобных треугольников получаем $(l_2 - l_1) : b = (s_2 - s_1) : p$. Вычислить отсюда удлинение $l_2 - l_1$ участка bc трубки co. (Все линейные величины следует выражать в одних и тех же единицах.)

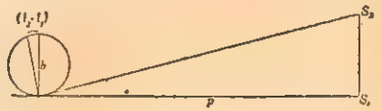

Рис. 128.

12) На какую долю первоначальной длины удлинилась трубка?

13) На какую долю первоначальной длины удлинялась трубка при нагревании на каждый градус? Полученный результат, равный $\frac{l_2 - l_1}{l_1 (t_2 - t_1)}$, есть **коефициент линейного расширения** вещества трубки.

14) Справившись с таблицей линейных коефициентов расширения (стр 142), вычислить процентную ошибку полученного результата.

§ 176. Коефициентом линейного расширения, как видно из предыдущего §, **называется дробь, показывающая, на какую долю удлиняется стержень при нагревании его на каждый градус.**

Поэтому, если обозначим длину стержня при 0° буквою l_0, а коефицпент линейного расширения буквой k, то при нагревании стержня до температуры t° он получит удлинение, равное kl_0t; следовательно, длина его при t° будет $l_t = l_0 + kl_0t$ или $l_t = l_0 (1 + kt)$.

Понятно, что такое соотношение имеет место не только для длины, но и для всех линейных размеров тела. Если тело имеет

полость, то при нагревании линейные размеры полости увеличиваются в таком же отношении, как и наружные размеры.

Коефициент линейного расширения различных веществ между 0° и 100°.

Свинец	0.000029	Чугун	0.000010
Латунь	0.000018	Платина	0.000009
Медь	0.000017	Стекло различных сортов, около	0.000009
Железо, сталь	0.000012	Алмаз	0.000001

Задача 1. Железо куют при температуре около 800°. Если кузнец мерит свою работу в накаленном состоянии, то какую часть по длине должен он прикидывать?

Реш. Если бы коефициент расширения железа до температуры 800° оставался равным 0.000012, то ответ был бы $0.000012 \times 800 = 0.01$, т.-е. сантиметр на метр. На самом деле — еще несколько больше, потому что при более высоких температурах тела расширяются сильнее, чем при низких.

Задача 2. Если железная паропроводная труба при 0° имеет 20 m длины, то как велика ее длина, когда по ней идет пар, имеющий температуру 100°?

Реш. По формуле $l_t = l_0(1 + kt)$ имеем $l_t = 20(1 + 0.000012 \times 100) = 20.024$ m.

§ 177. Тепловое расширение твердых тел в практике. — „Бандажи“ (шины) колес железнодорожных вагонов делаются так, что их внутренний диаметр чуть-чуть меньше диаметра корпуса колес (рис. 129). При насадке бандажа его равномерно нагревают, чтобы он расширился, и чтобы корпус входил в него. По охлаждении бандаж является искусственно растянутым, а потому в нем развиваются силы упругости, которые держат корпус совершенно неподвижно. Подобно этому, для придания прочности дулам современных артилерийских орудий, их составляют из ряда стальных труб и колец, при чем каждый внешний ряд в горячем состоянии надевается на внутренние.

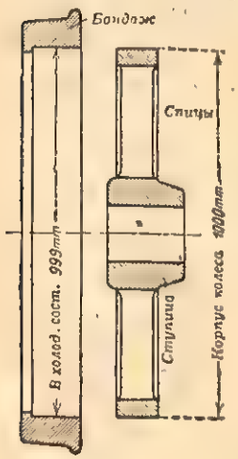

Рис. 129.

Чтобы железнодорожные рельсы в жаркое время года, удлинившись, не стали соприкасаться и не давили друг на друга, между ними оставляют достаточный просвет[1]). — Чтобы от влияния температуры не получалось нежелательных напряжений в железных „фермах“, поддерживающих крышу здания или полотно моста, один конец фермы не прикрепляется неподвижно к опорной стене, а кладется на каток или „роликовую опору“,

[1]) Однако рельсы трамвая свариваются между собой (для более легкого прохождения тока по ним). Это возможно благодаря тому, что они заложены плотно в мостовой и имеют ту же мало меняющуюся температуру, как и эта мостовая.

которая может ездить взад и вперед, в зависимости от сокращения или удлинения фермы.

Всякая литейная работа начинается изготовлением деревянной модели, по которой делается форма (обыкновенно в земле). Все размеры модели должны иметь определенный „допуск“ на „усадку“ металла при остывании. Чтобы модельщику не затрудняться соответствующими расчетами, ему дают масштаб, на котором деления на 1% длиннее истинной величины (так наз. „литейный“ фут или метр).

Плотное соединение металла со стеклом и т. п. материалами [это относится, напр., к проволочкам, вводящим ток в лампочки накаливания[1]), также к эмали, служащей для покрытия железной посуды] возможно лишь в том случае, когда у обоих соединяемых материалов приблизительно одинаковый коефициент расширения.

§ 178. Расширение жидкостей. — Так как жидкости (а равно и газы) не имеют собственной формы, то об их линейном расширении не может быть речи. Здесь под „расширением“ всегда подразумевают *увеличение объема*.

Коефициентом объемного расширения называется дробь, показывающая, на какую долю увеличивается объем тела при повышении его температуры на 1°.

Когда изучают расширение жидкости, содержащейся в сосуде, то необходимо принимать в расчет расширение сосуда. Жидкости расширяются при нагревании заметнее, чем твердые тела, притом одни больше, другие меньше.

Замечательную особенность представляет вода: если ее температура заключается между 0° и 4°, то она **при нагревании сжимается**, а при охлаждении расширяется. При температурах выше 4° вода следует общему правилу.

Поэтому при 4° вода занимает наименьший объем (а след., имеет наибольшую плотность).

§ 179. Расширение газов. Закон Ге-Люсака. — Из опытов, произведенных над различными газами, найден следующий закон: **для данной массы любого газа, находящегося под неизменным давлением, повышение температуры на 1° сопровождается увеличением объема (приблизительно) на $\frac{1}{273}$ часть того объема, который соответствует температуре 0°.** Это — „закон Ге-Люсака“. Дробь $\frac{1}{273}$ называется **коефициентом расширения газов.** Если назовем объем данной массы газа под каким-нибудь давлением p и при 0° буквою v_0, объем ее под тем же давлением p, но при t° — буквою v, то закон Ге-Люсака представится формулой:

$$v = v_0\left(1 + \frac{1}{273}t\right).$$

[1]) Эти проволочки делаются теперь из сплава железа с никелем.

Плотность есть величина обратно-пропорциональная объему данной массы вещества; поэтому зависимость плотности d газа от температуры (при неизменном давлении) будет выражаться следующей формулой:

$$d = \frac{d_0}{1 + \frac{t}{273}},$$

где d_0 есть плотность газа при 0° [1]).

Уменьшением плотности воздуха при нагревании объясняется печная „тяга". Когда огонь разгорелся, внутри печи — воздух горячий, плотность его меньше плотности атмосферного воздуха: образуются как бы сообщающиеся сосуды, из которых роль одного играет печная труба, а роль другого — наружное пространство. Так как внутри трубы плотность меньше, то столб здесь должен бы быть при равновесии выше. Начинается течение через печь в трубу; но в печи воздух согревается и становится снова легче и т. д.; таким образом равновесие не может установиться, получается непрерывная тяга.

§ 180. Уравнение состояния газов. — Помножив на давление p обе части формулы, выражающей закон Ге-Люсака, получим $vp = v_0p\left(1 + \frac{t}{273}\right)$. Закон Мариота говорит нам, что произведение v_0p можно заменить величиною C, которая получается от умножения *произвольного давления* на *объем данной массы газа под этим давлением и при 0°*. Поэтому будем иметь формулу:

$$vp = C\left(1 + \frac{t}{273}\right),$$

которая вполне выражает зависимость между температурой, давлением и объемом данной массы какого-нибудь газа. Множитель C есть значение произведения vp, соответствующее температуре 0°.

Эта формула называется **уравнением состояния газов.** Она позволяет решать задачи вроде следующей.

Задача. Имеется 209 cm³ водорода при 27°.8 и давлении 744 mm. Как велик будет объем этого количества при 0° и давлении 760 mm (т.-е. при так наз. „нормальных условиях")?

Реш. Подставив данные в уравнение состояния и помножив обе части на 273, получим $273 \times 209 \times 744 = C\ (273 + 27.8)$. Здесь C равно произведению давления 760 mm на искомый объем x; поэтому можем в последнем уравнении вместо C подставить 760 x; решая уравнение, получаем $x = 185$ cm³.

Подобные задачи часто встречаются в химии, где принято мерить количество газов их объемом при нормальных условиях.

[1]) Рекомендуется читателю изобразить графически два последние уравнения. При этом можно принять $v_0 = 1$ m³, $d_0 = 0.0013\ \frac{g}{cm^3}$ (что соответствует воздуху под давлением в 1 атмосферу).

§ 181. Нагревание газа при неизменном объеме. — Решим следующий вопрос: если объем нагреваемого газа остается неизменным (как это можно считать при нагревании газа в твердой оболочке), то как будет изменяться его давление в зависимости от температуры?

Из уравнения состояния газа определим давление $p = \frac{C}{v}\left(1 + \frac{t}{273}\right)$. Здесь C и v — по условию величины постоянные, t и p — переменные. Если t примет значение 0, то, называя буквою p_0 соответствующее значение давления, получим $p_0 = \frac{C}{v}$, потому предыдущее уравнение перепишется так:

$$p = p_0\left(1 + \frac{t}{273}\right).$$

Мы видим, что для газа, сохраняющего постоянный объем, повышение температуры на 1° вызывает увеличение давления на $\frac{1}{273}$ часть того давления, которое соответствует температуре 0°.

ГЛАВА XVI.

Распространение теплоты.

§ 182. Водяное отопление. — Всякое отопление имеет цель — тепловую энергию или „теплоту", образующуюся в топке, разнести по известному пространству. Рассмотрим устройство и действие водяного отопления. Это поможет нам понять вообще способы распространения теплоты.

В подвальном помещении дома устроен котел K (рис. 130) с топкой. От него идет „подъемная" труба R, которая на чердаке переходит в *не* показанную на рисунке, почти горизонтальную главную („магистральную") трубу; от главной трубы отходят несколько „разводящих" труб R′, соединенных с нагревательными приборами, установленными в отапливаемых помещениях (чаще всего это бывают „реберные батареи"). Наверху подъемной трубы R имеется „расширительный бак" B, сообщающийся с атмосферою через отверстие *o*; он служит для вмещения избыточного объема воды, получающегося вследствие расширения ее, а также для удаления воздуха

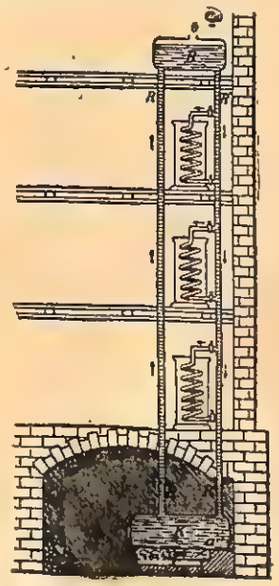

Рис. 130. Водяное отопление.

из системы. Разводящие трубы внизу примыкают к другой магистрали, которая входит в котел снизу (где буква *a*).

Нагретая, а потому сделавшаяся менее плотной, вода из котла поднимается по трубе R; ее замещает вода, притекающая сверху по трубам R'. „Циркулируя“ по системе и проходя между прочим по нагревательным приборам, нагретая вода, *несущая с собой тепловую энергию*, отдает ее (менее, чем она, нагретым) чугунным трубам, с которыми она соприкасается. Затем теплота, *распространяясь по чугуну* (опять-таки от более нагретых мест к менее нагретым), передается ребрам батарей. Открытая поверхность труб и ребер отдает тепло воздуху и другим окружающим телам. Нагревшийся воздух поднимается кверху, а на его место приходит холодный; таким образом в комнатном воздухе возникает циркуляция, которая стремится выровнять имеющиеся в нем разности температур.

Вдумавшись, мы замечаем здесь два рода явлений, объединенных одним началом.

1) Теплота может распространяться с места на место вместе с текучим (жидким или газообразным) веществом, которому она принадлежит. Такой способ распространения теплоты называется *конвекцией*[1]). Наглядный пример конвекции теплоты в воздушной среде мы находим в известном из начальных учебников опыте со свечой, поставленной между теплой и холодной комнатами.

2) Теплота может распространяться помимо движения какого бы то ни было вещества, например, вдоль твердого тела. (Так, если мы опустим в горячий чай серебряную ложечку, то выступающая из жидкости часть ее очень скоро нагревается так, что обжигает пальцы.) Такой способ распространения тепла называется *теплопроводностью*.

В обоих случаях **теплота распространяется от более нагретых мест к менее нагретым.**

§ 183. Хорошие и дурные проводники теплоты. — Разные вещества обладают весьма неодинаковой способностью „проводить“ тепловую энергию.

Так, если мы внесем в пламя один конец медной палочки, то нам вскоре станет больно держать ее за другой конец; но если мы повторим этот опыт со стеклянной палочкой таких же размеров, то через такой же — и больший — промежуток времени можем не почувствовать никакого нагревания.

Поэтому различаются **хорошие и дурные проводники тепла.** Опыты показывают, что **хорошими проводниками теплоты являются металлы; все тела неметаллические дурно проводят теплоту. Всего хуже проводят теплоту газы.** Поэтому неметаллические тела волокнистого, рыхлого строения (шерсть, шелк, пух, вата, пенька, пакля), содержащие много воздуха, являются очень худыми проводниками тепла.

---

[1]) Лат. conv ectio = *сопутствие*.

Разные металлы обладают далеко не одинаковою способностью проводить теплоту. Всего лучше проводит серебро; потом идут: медь, железо, свинец, ртуть.

Опыт. Возьмем железную и медную проволоку толщиною около 1 mm, длиною около 10 cm. Одни концы их скрутим вместе и будем скрученное место нагревать в пламени свечи, а другие концы будем держать — одной рукой железную проволоку, другой медную. За конец железной проволоки можно держать не обжигаясь, а медная скоро станет слишком горячей.

Совершенно **не проводит теплоты пустое пространство**

§ 184. Технические применения дурных проводников тепла. — Дурные проводники тепла или так наз. „изоляционные[1]) материалы“ (войлок, пробка, асбест, очески, дерево и т. п.) употребляются, во-первых, для того, чтобы защитить ледники и холодные склады от прихода теплоты извне, а во-вторых, для того, чтобы магистральные трубы водяного отопления, паропроводы и т. д. предохранить от потери тепла наружу. Цилиндры паровых машин обыкновенно покрываются железным оцинкованным листом, привинчиваемым к „приливам“ цилиндра, благодаря чему между цилиндром и листом образуется воздушное пространство, плохо проводящее теплоту.

§ 185. Испускание и поглощение лучей. — Во многих книжках можно прочесть, что кроме конвекции и теплопроводности, есть еще один способ „распространения“ теплоты: теплота якобы может еще распространяться лучами, и якобы, напр., теплота солнца доходит до нас через огромное пустое пространство именно в виде лучей.

Это неверно, так как лучи, о которых говорится здесь, вовсе не суть теплота. Лучи, это — особый вид энергии: „световая“ или „лучистая“ энергия[2]). Часть тепловой энергии солнца превращается в лучистую; эта лучистая энергия с чрезвычайной быстротой (скорость света 300 000 $\frac{km}{sec}$) распространяется в окружающем пространстве; часть ее, которая попадает на землю или на другую планету, как принято говорить, *поглощается* поверхностью планеты, т.-е. превращается здесь в теплоту[3]).

Вообще всякое тело, нагретое сильнее окружающих тел, испускает на счет своего теплового запаса лучи видимые (т.-е. обыкновенный свет) или невидимые[4]); когда среда, находя-

---

[1]) От франц. isoler = *уединять*

[2]) К сожалению, о лучистой энергии трудно говорить в элементарном курсе с достаточной наглядностью, потому что приборы, регистрирующие присутствие ее, недоступны для начинающих.

[3]) Подобно этому при телефонном разговоре звуковая энергия говорящего превращается в энергию электрических токов, которая воспринимается приемным апаратом и снова превращается в звук. Но было бы ошибкой сказать, что здесь звук распространяется по проволоке.

[4]) Тело испускает меньше лучей, если поверхность его — блестящая. Поэтому самовары, чайники и т. п. делают блестящими, гладкими, белыми: они тогда лучше сохраняют свою теплоту.

щаяся на пути этих лучей, прозрачна для них (значительной прозрачностью обладает, напр., воздух), то лучи доходят до поверхности какого-нибудь другого, слабее нагретого тела; если эта поверхность — темная, шероховатая, то лучи будут ею поглощены и преобразуются здесь в теплоту. Вследствие этого температура тела, испускающего лучи, понижается, а поглощающего — повышается.

Когда мы стоим около пылающего очага или действующей паровой машины, то теплота, ощущаемая нашей кожей, имеет такое же происхождение: очаг на счет своего запаса тепловой энергии посылает во все стороны видимые и невидимые (а паровой цилиндр — только невидимые) лучи; энергия этих лучей, достигнув нашей кожи, превращается здесь в теплоту.

Когда вблизи нас находится большая глыба льда, роли меняются: наше тело, будучи более теплым, „излучает" из себя энергию по направлению к ледяной глыбе; теряя теплоту, мы ощущаем холод.

Излучение играет важную роль в действии системы водяного (или другого) отопления (§ 182). Нагретые печи, батареи и „радиаторы" излучают энергию к окружающим телам.

Мы видим, что и в случае излучения подтверждается общий закон: **теплота сама собой стремится передаваться от теплых тел к холодным.**

ГЛАВА XVII.

Измерение количеств теплоты. Теплоемкость.

§ 186. Количество теплоты. — Пусть у нас имеется ровно горящая газовая (или спиртовая) горелка. Ясно, что в каждую единицу времени она выделяет одно и то же количество теплоты. Спрашивается: чем измерять количество теплоты, которое уступает горелка предмету, нагреваемому ею?

Сделаем следующий опыт. Поставим на горелку тонкостенный (стеклянный или жестяной) сосуд, содержащий 1 kg воды, при чем термометр показывает температуру воды. Пусть в течение 5 минут температура воды повысилась на 20°.

В тот же сосуд нальем $^1/_2$ kg воды и, поставив его на горелку попрежнему, будем опять следить за температурой воды в течение 5 минут. Теперь мы увидим повышение температуры приблизительно на 40°. В обоих опытах количество тепла, отданное пламенем сосуду с водой, очевидно, одно и то же; и мы видим, что произведение:

количество воды × повышение температуры

также в обоих опытах одинаково. Отсюда мы заключаем, что это произведение является правильной *мерой количества теплоты.*

За единицу принимается то **количество теплоты, которым 1 kg воды нагревается на 1°.** Эта единица называется **большой калорией**[1]).

Часто употребляется более мелкая единица теплоты, составляющая $\frac{1}{1000}$ **большой калории** и называемая **малой калорией.** Понятно, что **одною малою калорией один грамм воды нагревается на один градус.**

Большая калория сокращенно обозначается Cal, а малая cal.

Само собой ясно, что если 1 g воды *остывает* на 1°, то он *теряет* (или — из него выделяется) 1 cal.

§ 187. Теплота нагревания воды. — Положим, что температура m килограммов воды повышается от t° до t_1°. Сколько тепловой энергии берет вода при этом?

1 kg воды, нагреваясь на 1°, берет 1 большую калорию.

1 kg воды, нагреваясь на $(t_1 - t)$°, берет $(t_1 - t)$ калорий.

m килограммов воды, нагреваясь на $(t_1 - t)$°, возьмут $m(t_1 - t)$ Cal.

Понятно, что, **остывая от более высокой температуры t_1 до более низкой температуры t, m килограммов воды потеряют те же $m(t_1 - t)$ калорий.**

Теплота, расходуемая на нагревание какого-нибудь тела или отдаваемая телом при его охлаждении, называется **теплотою нагревания** тела. Мы вывели здесь формулу для теплоты нагревания воды.

Задача. — Смешивают m kg воды при температуре t° и m_1 kg воды при *более высокой* температуре t_1°. Предполагается, что передача теплоты происходит только между этими двумя количествами воды, так что никакие внешние предметы не берут теплоты у нашей смеси и сами также не дают ей ничего. Найти температуру смеси.

Реш. Назовем x искомую температуру. Тогда, очевидно, $t_1 > x > t$; m килограммов более холодной воды к концу опыта повысят свою температуру на $(x - t)$ градусов, а m_1 килограммов воды более теплой понизят свою температуру на $(t_1 - x)$ градусов.

При этом более холодная вода получит $m(x - t)$ калорий, а более теплая вода отдаст $m_1(t_1 - x)$ калорий.

Количество теплоты, полученное холодной водой, равно количеству теплоты, отданному водою более горячею, или $m(x - t) = m_1(t_1 - x)$. Решая это уравнение, находим: $x = \frac{mt + m_1 t_1}{m + m_1}$.

§ 188. Теплоемкость. — Полоску свинца, весом $^1/_2$ kg, согнем в спираль (в форме часовой пружины) и положим на дно сосуда, употреблявшегося для опытов § 186; туда же нальем $^1/_2$ kg воды. Будем нагревать сосуд в течение 5 минут *так же,*

---

[1]) От лат. слова calor = *жар.*

как в прежних опытах. Термометр покажет повышение температуры приблизительно на 38.8°. Из этого видно, что $^1/_2$ kg свинца при повышении температуры на 1° берут гораздо меньше теплоты, чем $^1/_2$ kg воды.

Сделаем подсчет. В первом опыте 1 kg воды в течение 5 минут нагрелся на 20°, след., получил от пламени 20 Cal. Столько же отдало пламя в последнем опыте, при чем на нагревание воды пошло $^1/_2 \times 38.8 = 19.4$ Cal, след., на нагревание свинца пошло 0.6 Cal. Для повышения температуры 1 kg свинца на 38°.8 потребовалось бы 1.2 Cal; значит, для повышения температуры 1 kg свинца на 1° требуется $1.2 : 38.8 = 0.03$ Cal.

Если мы повторим подобный опыт с другими твердыми или жидкими веществами, повышение температуры будет всегда иное; оно всегда будет больше, чем при нагревании одной воды в количестве 1 kg. Из этого следует, что каждое вещество, взятое в количестве 1 kg и нагреваемое на 1°, берет определенное количество теплоты, зависящее от рода вещества.

Число калорий, поглощаемое / выделяемое единицей массы какого-нибудь вещества при нагревании / охлаждении его на 1°, называется теплоемкостью вещества[1]).

При этом, если масса выражается в килограммах, то количество теплоты выражается в больших калориях, а если масса выражается в граммах, то количество теплоты выражается в малых калориях. Таким образом численное значение теплоемкости получается одно и то же в обоих случаях.

Из определения калории вытекает, что **теплоемкость воды равна единице.**

Иногда говорят также **о теплоемкости тела.** Теплоемкостью тела называется число калорий, поглощаемое / выделяемое каким-нибудь телом при нагревании / охлаждении его на 1°.

§ 189. Калориметр. — Для измерения количеств теплоты и определения теплоемкости различных веществ служат приборы, называемые калориметрами[2]). Калориметр простейшего устройства состоит из двух жестяных сосудов, вложенных один в другой, отделенных друг от друга слоем воздуха; две деревянные палочки, сложенные накрест, поддерживают внутренний сосуд. Во внутреннем сосуде содержится вода. В калориметре находится термометр; нередко бывает еще мешалка для перемешивания воды.

Положим, что мы кладем в воду калориметра какое-нибудь более нагретое тело. Тогда теплота будет передаваться от внесенного тела к воде калориметра, при чем, благодаря перемешиванию воды, температура ее более или менее скоро уравняется с температурой тела. Рассмотрим, какие тела имеют расход и приход теплоты в таком опыте.

[1]) Теплоемкость вещества иногда называют *удельной теплотой*, также *удельной теплоемкостью.*

[2]) От слов: cálor (лат.) = *жар*, metrò (греч.) = *мерю.*

1) Внесенное в калориметр тело *потеряло* некоторое количество теплоты; назовем это количество теплоты Q.

2) Вода *получила* некоторое количество теплоты; назовем его $q_в$.

3) Также *получили* некоторое количество теплоты калориметрические сосуды и находящиеся в них предметы (термометр и мешалка); назовем это количество $q_к$.

4) Наконец, имела место еще передача теплоты от калориметра к окружающим предметам; назовем буквой q_0 количество теплоты, *полученное* окружающими предметами.

Все эти величины пусть выражаются в малых калориях.

Теплота есть форма энергии; так как энергия не создается и не уничтожается, то мы будем иметь равенство:

$$Q = q_в + q_к + q_0.$$

Члены $q_к$ и q_0, благодаря особенностям устройства калориметра, малы[1]), так что в опытах не особенно точных на эти члены можно не обращать внимания. У нас останется:

$$Q = q_в.$$

Другими словами, можно считать, что количество теплоты, отданное телом, опущенным в калориметр, равно количеству теплоты, полученному водой.

Но количество теплоты, полученное водой, может быть вычислено очень просто. Пусть температура воды до внесения тела в калориметр была t°, а окончательная температура ее (равная окончательной температуре тела) была Θ°. Масса воды в калориметре пусть равна M граммам. Тогда $q_в = M(\Theta - t)$; подставляя в предыдущее равенство, будем иметь:

$$Q = M(\Theta - t).$$

Таким-то образом посредством калориметрического опыта можно узнать число калорий, выделяемое испытуемым телом.

§ 190. Лабораторная работа № 20. — *Определить теплоемкость металла (железа, меди, латуни или свинца).*

Необходимые предметы: 1) весы с разновесками: 2) калориметр[2]); 3) термометр; 4) кусок металла с крючком или ушком; 5) нитка; 6) вода комнатной температуры; 7) котел (или чашка) с кипящей водой; 8) фильтровальная бумага.

Способ выполнения. — 1) Свесить внутренний сосуд калориметра. NB. Как это взвешивание, так и все следующие производить с точностью не более 0.1 g.

[1]) Теплоемкость калориметра мала, поэтому член $q_к$ мал. — Пространство между двойными стенками калориметра очень плохо проводит теплоту, поэтому член q_0 мал.

[2]) Емкость внутреннего сосуда 200—250 cm³. Для самых грубых опытов можно пользоваться калориметром из одного сосуда (как в опытах § 186 и 188). Таким сосудом может служить жестянка из-под консервированного молока.

2) Налить во внутренний сосуд около 150 cm³ воды и свесить его с водою. NB. На стенках сосуда не должно быть приставших водяных капель.

3) Вложить внутренний калориметрический сосуд во внешний.

4) Свесить испытуемое тело.

5) Привязав нитку к испытуемому телу, погрузить его в кипящую воду и держать его здесь четверть часа. Записать температуру T кипящей воды; эту же температуру примет погруженное тело. NB. Определения температуры производятся с точностью до 0.1 градуса.

6) Непосредственно перед тем, как кончится срок пребывания тела в кипятке, определить температуру t воды в калориметре, осторожно помешивая при этом воду термометром. NB. В дальнейшем продолжении опыта стараться не нагреть калориметр своим телом.

7) Тотчас после этого, придвинув калориметр близко к котлу, быстро перенести тело из котла в калориметр; затем убрать калориметр подальше от котла.

8) Осторожно помешивая воду термометром, определить наивысшую температуру Θ, до которой поднимется термометр. Это будет *окончательная температура* воды и тела в произведенном опыте.

9) Сколько воды было налито в калориметр?
10) На сколько градусов повысилась температура этой воды?
11) Сколько калорий поглотила вода калориметра?
12) Сколько калорий выделило испытуемое тело?
13) На сколько градусов остыло испытуемое тело?
14) Как велика теплоемкость испытуемого тела?
15) Как велика теплоемкость испытуемого металла?

Вопрос. Каким образом при помощи принадлежностей настоящей работы можно определить теплоемкость какой-нибудь жидкости?

Замечание. Подобный способ определять теплоемкость какого-либо вещества называется „способом смешения“.

§ 191. Теплоемкости различных веществ приведены в следующей таблице:

Вода	1	Воздух при пост. объеме	0.17
Этиловый алкоголь	0.58	Стекло	около 0.15
Керосин	0.51	Железо	0.11
Лед	0.5	Цинк	0.094
Сухое дерево	около 0.4	Латунь	0.094
Воздух при постоян. давлен.	0.24	Медь	0.094
Алюминий	0.22	Ртуть	0.033
Кокс и уголь	около 0.2	Платина	0.032
Различн. камен. породы ок.	0.2	Свинец	0.031

Мы видим, что вода отличается среди других веществ весьма большою теплоемкостью, и что теплоемкость металлов вообще мала сравнительно с теплоемкостью воды.

§ 192. Теплота нагревания какого-нибудь тела. — Если масса тела m, а теплоемкость вещества его c, то сколько калорий потребуется для нагревания этого тела от t до t_1 градусов?

Единица массы данного вещества, нагреваясь на 1°, берет c калорий.

m единиц массы данного вещества, нагреваясь на 1°, берут mc калорий. (Другими словами, теплоемкость данного тела равна mc.)

m единиц массы данного вещества, нагреваясь на (t_1 — t) градусов, берут mc (t_1 — t) калорий.

Понятно, что столько же теплоты *выделит* то же тело, если от температуры t_1° *остынет* до температуры t°.

Задача. Кусок платины, весом 9.5 g, был вынут из стеклянной печи и быстро внесен в 135.2 g воды при температуре 25°.7. Температура воды поднялась до 28°.2. Узнать температуру печи. (Это — „калориметрический“ способ определения высоких температур, применимый на практике.)

Реш. Теплота нагревания платины $9.5 \times 0.032 \times (x - 28)$, где x — температура печи. Теплота нагревания воды 135.2 (28.2 — — 25.7). Приравнивая друг другу оба количества и решая полученное уравнение, найдем x = 1140°.

§ 193. Теплотворная способность топлива. — Калориметрически можно определять весьма важную для техники величину — **„теплотворную способность“** или **„теплопроизводительность“** различных видов топлива. Так называется **число калорий, развивающееся при сгорании единицы массы какого-нибудь горючего материала.** Для измерения теплотворной способности пользуются особыми толстостенными сосудами — „калориметрическими бомбами“; в такую бомбу вводят кислород и отвешенное количество испытуемого топлива, помещают ее в калориметр, затем внутри бомбы посредством электрической искры производят зажигание находящейся там пробы.

В следующей табличке приведены: под буквой Q значения теплотворной способности различных материалов в Cal на 1 kg (или — все равно — в cal на 1 g), а под буквой m — требуемые весовые количества воздуха для сгорания единицы массы топлива.

	Q	m		Q	m
Дерево вылежавшееся	2800	8.9	Антрацит грушевский	7600	14.4
„ сильно высушенное	4400	12.1	Древесный уголь металлургический	7400	15.9
Торф хорошего качества	3300	9.8	Кокс металлургический	7000	14.9
Бурый уголь	от 3000 до 5100	9—15	Нефтяные остатки	10600	12.4
Каменный уг.	от 4500 до 8000	12.5—21	Бензин, керосин	10300	—

Задача. Пусть будет Q — теплопроизводительность топлива, m — весовое количество воздуха, расходуемое при сожигании единицы веса топлива, c — средняя теплоемкость продуктов горения, и пусть вследствие потерь, обусловленных теплопроводностью и излучением, на нагревание продуктов горения идет

не вся теплота Q, а только часть ее ηQ (η — правильная дробь). Требуется найти повышение температуры t, достигаемое в результате горения.

Реш. Теплота ηQ повышает на t° температуру $(1+m)$ единиц массы вещества со средней теплоемкостью c. Поэтому имеем уравнение: $\eta Q = (1+m)ct$, откуда $t = \frac{\eta Q}{c(1+m)}$. Отсюда, полагая (по Менделееву) $c = 0.27$, $\eta = 0.8$, получим для вылежавшегося дерева $t = 840°$, для нефтяных остатков $t = 2360°$, и т. д.

ГЛАВА XVIII.

Плавление и отвердевание.

§ 194. Плавление. — Многие твердые вещества при достаточном нагревании „плавятся", т.-е переходят в жидкое состояние. Примерами могут служить: металлы, стекло, лед (о котором часто говорят: „тает" вместо „плавится").

Из веществ, способных плавиться, некоторые (напр., стекло) при нагревании постепенно размягчаются и, наконец, делаются жидкими.

Другие, наоборот, оставаясь все время твердыми, при некоторой определенной температуре вдруг начинают переходить в жидкое состояние.

Температура, при которой совершается этот переход, называется **температурой плавления** или **точкой плавления**. При температуре более высокой, чем точка плавления, эти вещества в твердом состоянии существовать не могут. Типичным примером служит **лед**, для которого точка плавления лежит при 0°.

Положим, что мы имеем подобное вещество в жидком состоянии и постепенно охлаждаем его; когда температура понизится до „точки плавления", наше вещество может также вдруг начать переходить в твердое состояние. Таким образом здесь **температура отвердевания равна температуре плавления**. Например, лед тает при 0°, и вода замерзает также при 0°.

§ 195. Скрытая теплота плавления. — Приготовим смесь чистого снега или льда с водой. Будем ее все время тщательно перемешивать для того, чтобы она во всех местах сохраняла равномерную температуру, и будем наблюдать за температурой ее. Мы можем поставить такую смесь в теплое место, можем вынести ее на сильный мороз; все равно — мы заметим, что температура нашей смеси останется постоянной и равной 0°, хотя смесь или поглощает извне теплоту, или, наоборот, отдает теплоту окружающим предметам.

Мы заключаем, что теплота, поглощаемая смесью извне, тратится здесь не на повышение температуры вещества, а на преодоление сил сцепления между его частицами при плавлении вещества.

Число калорий, которое должно быть затрачено для превращения единицы массы твердого вещества, без повышения температуры, в жидкость, называется скрытою теплотою плавления (или просто **теплотою плавления**)[1]).

Если жидкость переходит в твердое состояние, то она *выделяет* количество теплоты, равное скрытой теплоте плавления.

§ 196. Лабораторная работа № 21. — *Определить температуру отвердевания серноватисто-натриевой соли (гипосульфита)* $Na^2S^2O^3 + 5H^2O$.

Необходимые предметы: 1) термометр; 2) пробирка с гипосульфитом; 3) штатив с зажимом; 4) кипящая вода; 5) ручной зажим; 6) часы; 7) маленький кристалл гипосульфита (в бумажке); 8) клетчатая бумага.

Способ выполнения. — 1) Держа пробирку с помощью ручного зажима, опустить ее в кипящую (или просто горячую) воду. Когда гипосульфит начнет плавиться, опустить в пробирку термометр. (При какой температуре приблизительно плавится гипосульфит?) Держать пробирку в горячей воде, пока температура гипосульфита не поднимется до 70°.

2) Вынув пробирку из воды, укрепить ее на штативе и следить за температурой гипосульфита, оставляя жидкость в покое.

3) Записывать температуры через каждую минуту в такую таблицу:

Время в минутах	Температура гипосульфита	Замечания
0	. . . . , .	
1	. . . . , .	
2	. . . . , .	
3	. . . . , .	
. . . .	. . . . , .	

Не остается ли гипосульфит в жидком состоянии при температуре, которая значительно ниже температуры его плавления? Явление называется **переохлаждением жидкости**[2]).

4) Если температура гипосульфита близка к комнатной (пощупать пробирку пальцами), но отвердевания все еще не происходит, бросить в пробирку кристалик твердого гипосуль-

---

[1]) Эта теплота называется скрытою только потому, что приход или утрата ее не обнаруживаются термометром.

[2]) Итак, мы видим, что твердое вещество не может существовать при температуре *выше* температуры плавления, но жидкость может существовать при температуре *ниже* температуры плавления. Впрочем, надо сказать, что явление переохлаждения не одинаково легко наблюдается у различных веществ.

фита, продолжая записывать температуры. Что происходит в пробирке? Опять пощупать пробирку пальцами. **Выделение скрытой теплоты плавления.**

В столбце, озаглавленном „Замечания", записать, когда наступило отвердевание, и был ли брошен кристалик.

5) Когда температура, поднявшись, вновь опустится до 40°, прекратить опыт. Изобразить графически изменение температуры в зависимости от времени.

6) Как высока точка отвердевания гипосульфита? Сравнить ее с точкой плавления. Которая из этих точек определена более точно? Можно ли утверждать, что они совпадают?

7) Отметить в „Замечаниях" и на графике область переохлаждения гипосульфита.

§ 197. Лабораторная работа № 22. — *Определить скрытую теплоту плавления льда.*

Необходимые предметы: 1) весы с разновесками; 2) калориметр; 3) термометр; 4) вода комнатной температуры [1]; 5) куски льда при температуре 0°; 6) фильтровальная бумага; 7) мензурка.

Способ выполнения. 1) Свесить внутренний сосуд калориметра.

2) Налить в него около 150 cm³ воды и свесить снова.

3) Вставить внутренний сосуд в наружный.

4) Приготовить кусок льда, имеющего температуру 0°, весом около 10 — 15 g.

5) Определить температуру воды, *и тотчас же после этого* —

6) быстро осушить лед фильтровальной бумагой и опустить его в калориметр.

7) Тщательно помешивая воду термометром, следить за температурой (в то же время наблюдать за уменьшением количества льда). Отсчитать самую низкую температуру, указываемую термометром. Что происходит в этот момент со льдом?

8) Вынуть термометр, стараясь унести с ним как можно меньше воды.

9) Свесить внутренний калориметрический сосуд с водою, содержащеюся в нем.

10) Сколько было взято воды и сколько льда?

11) Сколько калорий отдала вода?

12) Сколько калорий пошло на нагревание воды, образовавшейся из льда?

13) Сколько калорий пошло на обращение льда в жидкое состояние?

14) Как велика скрытая теплота плавления льда?

§ 198. Таблица. — В следующей таблице приведены для разных веществ **температуры плавления t° и скрытые теплоты плавления L** (в cal на 1 g или в Cal на 1 kg вещества).

[1]) Еще лучше пользоваться водою, нагретою на 2 — 4 градуса выше комнатной температуры.

	t	L		t	L
Твердый водород	— 259°	—	Висмут	269	—
Твердый кислород	— 227	—	Кадмий	321	—
Этиловый эфир	— 118	—	Свинец	327	5.5
Этиловый спирт	— 112	—	Цинк	419	28
Аммиак	— 78	—	Алюминий	658	102
Азотная кислота	— 42	—	Серебро	961	22
Ртуть	— 38.9	2.8	Золото	1063	—
Скипидар	— 10	—	Медь	1083	44
Вода	0	80	Чугун, смотря по содержанию углерода, от	1140 до 1500	23—34
Серная кислота	10	—	Железо чистое	1520	6
Уксусная кислота	17.5	—	Платина	1765	27
Гипосульфит	48.2	—	Иридий около	2300	—
Стеарин	55.6	—	Тантал	2900	—
Нафталин	80.4	—	Вольфрам	3000	—
Камфора	176	—			
Олово	232	14			

Уголь под атмосферным давлением не плавится вовсе, а, будучи нагрет до 3500°, переходит в газообразное состояние.

Стекло принадлежит к числу веществ, не имеющих определенной температуры плавления. Различные сорта его размягчаются и обращаются в жидкое состояние при различных температурах (от 500° до 1400°).

Задача 1. Сколько теплоты нужно потратить для нагревания и расплавления (при 1200°) тонны чугуна, средняя теплоемкость которого равна 0.17, а скрытая теплота плавления 32?

Реш. Будем считать за начальную температуру 0°. Для нагревания до 1200° нужно затратить $0.17 \times 1000 \times 1200 = 204000$ Cal, да на расплавление пойдет $32 \times 1000 = 32000$ Cal, а всего 236000 Cal.

Задача 2. Желают охладить жидкость до температуры θ° прибавлением льда. Количество жидкости M, теплоемкость ее c, начальная ее температура t°. Сколько льда потребуется для этого, если берется лед при температуре 0°?

Реш. Назовем искомое количество льда буквой x. Жидкость отдаст при охлаждении $Mc(t-\theta)$ калорий, из них на плавление льда пойдет 80x калорий, да на нагревание воды, образовавшейся из льда, от 0° до θ° пойдет θx калорий. Из уравнения $Mc(t-\theta) = 80x + \theta x$ найдем $x = \frac{Mc(t-\theta)}{80+\theta}$.

§ 199. Изменение объема вещества при плавлении и при отвердевании. — Огромное большинство веществ в твердом состоянии плотнее, чем в жидком. Примеры: воск, парафин, стеарин, олово, свинец и мн. др. Твердые куски этих веществ тонут в собственной жидкости. Можно сказать, что вещества, принадлежащие к этому типу, при плавлении расширяются, а при отвердевании сжимаются.

Есть, напротив, очень немного веществ, которые в жидком состоянии плотнее, чем в твердом. К числу этих исключительных веществ принадлежит вода: лед плавает не только в холодной воде, но даже в кипящей. Эти вещества при плавлении сжимаются, а при отвердевании расширяются. Это расширение происходит с огромной силой, как показывает следующий опыт: чугунный сосуд наполняют водой и, завинтив наглухо, кладут в охлаждающую смесь льда с солью. При замерзании воды сосуд лопается.

§ 200. Зависимость точки плавления от давления.—Если тело, подобно большинству тел, расширяется при плавлении, то, подвергая его сильному давлению, мы *затрудняем* переход его в жидкое состояние: чтобы оно, несмотря на испытываемое им сильное давление, расплавилось, придется нагревать его более сильно. Поэтому **у тел, расширяющихся при плавлении, точка плавления повышается с увеличением давления.** Опыт показывает, напр., что воск, плавящийся при 64° под атмосферным давлением, плавится только при 80°, если его подвергнуть давлению в 800 атмосфер.

Если же тело при плавлении сжимается, то, подвергая его сильному давлению,—а следовательно, сжимая его,—мы *помогаем* ему плавиться; оно расплавится, благодаря давлению, при температуре менее высокой, чем обычная точка плавления. Итак, **у тел, сжимающихся при плавлении, точка плавления понижается с увеличением давления.** Так, лед под давлением 700 атмосфер плавится уже при —5°.

§ 201. Плавление смесей и сплавов. Охлаждающие смеси.—**Смеси нескольких веществ обыкновенно плавятся (и затвердевают) при температуре низшей, чем те вещества, из которых они составлены.** Точка плавления при этом может не совпадать с точкой затвердевания.

Примером являются мягкие припои, напр., припой из равных весовых количеств олова, свинца и висмута, плавящийся уже при 124°. Из тех же металлов и кадмия можно составлять сплавы, которые плавятся просто в горячей воде.

Важное значение в машиностроении имеют так наз. *белые* или *антифрикционные*[1]) металлы, иначе—„бабит", по имени изобретателя. Это—сплавы свинца с оловом, сурьмой и медью. Они употребляются для заливки внутренних поверхностей подшипников, с которыми непосредственно соприкасаются трущиеся части. При возникновении значительного трения они выплавляются, так что хотя машину приходится остановить, но зато шейка вала остается неповрежденной.

Чугун, содержащий 4.3% углерода, плавится при 1140°, тогда как наиболее плавкая из его составных частей, а именно железо, плавится при 1520°.

---

[1]) От слов anti (греч.) = *против*, frictio (лат.) = *трение*.

Растворы солей в воде начинают замерзать при температуре ниже 0°; чем крепче раствор, тем ниже температура замерзания. Морская вода, содержащая около $3^1/_2$% солей, замерзает около —2°, при чем выделяется чистый лед, а соли остаются в растворе.

Отсюда понятно, что если примешать поваренную соль ко льду или снегу, то он тает: для такой смеси (если соли взято достаточно) температура плавления лежит значительно ниже 0°; так что хотя лед в отдельности и соль в отдельности могут существовать в твердом состоянии при 0°, но, будучи смешаны, например, в отношении: 1 часть соли к 3 частям воды,—они уже не могут быть в твердом виде даже при температуре —20°. А так как при растворении солей в воде, подобно тому, как при плавлении, требуется разрушить связи частиц твердого вещества и стало-быть затратить теплоту, то смесь льда с солью, переходя в жидкое состояние, превращает свою собственную теплоту в „скрытую": смесь охлаждается, понижая свою температуру примерно до —20°.

Охлаждающая смесь льда с поваренной солью широко применяется в холодильном деле для сохранения скоропортящихся продуктов, как мясо, рыба и др. Смешивая со льдом иные соли, чем поваренная, можно получить еще гораздо более сильный холод.

ГЛАВА XIX.

Парообразование и конденсация.

§ 202. Кипение.—Нальем „сырой" воды в стеклянный сосуд и будем подогревать на пламени горелки, замечая температуру воды по опущенному в нее термометру. С начала нагревания будут видны на свет струйки, поднимающиеся со дна: нагреваясь, вода расширяется, становится легче и поднимается кверху, а холодная опускается на ее место. Мы называем такое явление конвекцией; благодаря конвекции, температура будет повышаться довольно равномерно во всех местах сосуда. Когда вода несколько нагреется (градусов до 50), на дне и стенках сосуда станут появляться небольшие газовые пузырьки: это—воздух, который был растворен в воде; так как теплая вода не может содержать столько растворенных газов, как холодная, то при нагревании излишек воздуха выделяется. По мере дальнейшего нагревания пузырьки становятся больше и многочисленнее: они состоят уже из смеси воздуха с довольно значительным количеством водяного пара. Когда вода нагреется еще больше (градусов до 90), со дна начнут отделяться большие пузыри, наполненные одним почти паром, но они не будут еще доходить доверху, а исчезают, снова обращаясь в жидкость или, как говорится, „конденсируясь"[1])

---

[1]) От лат. condénso = *сгущаю*.

в более холодных слоях воды. При этом слышен особый шум (подобный шум издает самовар, готовый закипеть). Скоро уже наступит кипение. Действительно, пузыри поднимаются все выше и выше; наконец, когда вся вода прогреется до точки кипения, пузыри пара начинают образовываться по всей массе воды, бороздя ее непрерывно и заставляя бурлить и клокотать; они поднимаются сквозь поверхность воды и здесь лопаются; освободившийся пар улетает в восходящем токе, какой бывает над всяким нагретым предметом. Если станем держать над сосудом какой-нибудь холодный предмет (опрокинутую стеклянную воронку, лезвие ножа), то этот последний немедленно покроется каплями воды: здесь происходит **конденсация** пара [1]). Если сосуд имеет (как колба) узкое отверстие, то выделяющийся пар увлечет с собою весь воздух, и в сосуде над поверхностью воды будет находиться один только пар; его температура близка к 100°. Вода теперь „кипит ключом"; опущенный в нее термометр показывает при этом также около 100° и далее не повышается.

§ 203. Давление пара кипящей жидкости. — Водяной пар, благодаря своему давлению, является источником двигательной силы в паровых машинах; поэтому изучение его свойств чрезвычайно важно. Решим прежде всего вопрос: как велико давление пара воды, кипящей на открытом воздухе?

Ответ почти очевиден. Пар, поднимающийся из кипящей воды, находится в соприкосновении с воздухом; стало-быть, *его давление равно давлению воздуха.*

Это можно подтвердить на опыте посредством следующего приспособления. В согнутую трубку AE (рис. 131), запаянную на конце A, вводят немного воды, кипячением освобожденной от воздуха, и наливают ртути. Когда трубка повернута, как показано на рис. 131, запаянное колено будет доверху наполнено водой и ртутью, а в открытом колене ртуть будет на более низком уровне C. На C действует атмосферное давление; на уровне же B, в закрытом колене трубки, давление меньше атмосферного на величину, измеряемую столбом ртути от уровня C до уровня B.

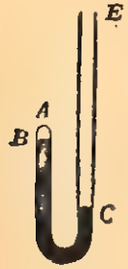

Рис. 131. AB — вода, BC — ртуть.

Поместим наш приборчик в стакан с водою, нагреваемый на пламени (рис. 132). Мы заметим, что только когда вода будет уже близка к кипению, в приборчике произойдет видимая перемена; в пространстве AB появится пар, который своим давлением станет вытеснять ртуть из закрытого колена. Когда вода в стакане закипит, уровни ртути в обоих коленах сравняются;

Рис. 132.

[1]) Над сосудом мы видим белое облачко или туман. Облачко это в общежитии нередко называют „паром", но это название неправильно, потому что здесь мы видим не пар, а конденсировавшиеся из него, вследствие соприкосновения с более холодным воздухом, капельки жидкой воды. Пар в точном смысле слова совершенно прозрачен и потому невидим.

это и покажет нам, что действительно **давление пара равно внешнему (атмосферному) давлению на поверхность воды.**

Мы замечаем, что в построенном нами приборчике явление кипения происходит проще, чем в открытом стакане. Здесь выделение паров начинается лишь тогда, как будет достигнута надлежащая температура. Пока не изменяется температура, не изменяется и давление паров. Состояние кипения, можно сказать, характеризуется здесь тем, что **жидкость и пар находятся в равновесии.**

Продолжим наш опыт. Бросим несколько соли в стакан с кипящей водой. Мы увидим, что кипение прекратится, и температура воды начнет увеличиваться выше 100° [1]). При этом ртуть в закрытом колене трубки станет быстро падать; ее скоро придется вынуть, чтобы вся ртуть не была изгнана в открытое колено. Это показывает, что **температура кипения и давление, под которым находится кипящая жидкость, — две величины, функционально связанные между собой; при увеличении одной увеличивается и другая.**

Это обстоятельство наводит нас на мысль, что при давлениях ниже атмосферного температура кипения воды будет ниже 100°. Но подтвердить это на опыте с нашим прибором наглядно нельзя, потому что здесь, при не особенно большой разности уровней B и C, мы не можем осуществить в A низких давлений [2]). Поэтому поступим иначе. Повторив опыт Торичелли (§ 160), впустим при помощи изогнутой „пипетки" (рис. 133) немного воды в Торичеллиеву пустоту; мы увидим, как, попав в пустоту, вода сразу вскипит, при чем образующийся пар своим давлением понизит ртутный столб в трубке на 1—2 сантиметра (смотря по температуре, при которой производится опыт [3]). Таким образом мы видим, что вода может кипеть и при температурах совсем низких, если только давление, которому она подвергается, достаточно мало.

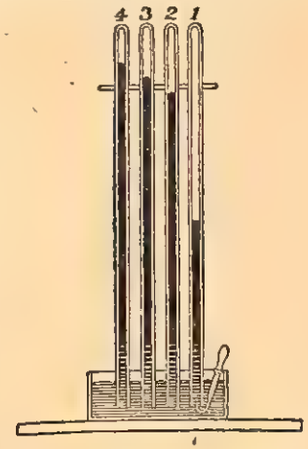

Рис. 133.

Это наблюдается и в природе. На высоких горах, где давление воздуха составляет только долю нормального атмосферного

[1]) Растворы солей в воде имеют точку кипения более высокую, чем чистая вода. Так, раствор 40 весовых частей поваренной соли в 100 вес. ч. воды кипит при 108°.

[2]) Впрочем, если мы, регулируя нагревание стакана, изловчимся поддерживать в нем постоянную температуру ниже температуры кипения (напр., 96°), то увидим, что действительно в трубке будет равновесие воды и пара при давлении меньшем атмосферного на несколько сантиметров ртутного столба.

[3]) Чтобы яснее видеть это понижение, полезно иметь рядом вторую Торичеллиеву трубку — контрольную (№ 4 на рис. 133).

давления, нагреваемая вода закипает при температурах 90°, 80° и еще ниже [1]).

§ 204. Зависимость температуры кипения от давления. — При помощи более совершенных, иногда очень сложных приборов ученые тщательно исследовали зависимость температуры кипения воды от давления на ее поверхность. Некоторые из полученных результатов показаны в следующей таблице. Здесь под буквой t даны различные температуры кипения воды, а под буквою p – давления выделяющихся из нее паров (или, другими словами, соответствующее каждой температуре кипения внешнее давление). До температуры 120° p выражено в миллиметрах ртутного столба, а выше 120° — в нормальных атмосферах. Читателю усиленно рекомендуется изобразить эти данные графически.

t°	p	t°	p	t°	p	t°	p	t°	p	t°	p
−10°	2.1	70°	234	102°	816	140°	3.57	220°	22.89	300°	84.80
0°	4.6	80°	355	104°	875	150°	4.70	230°	27.61	310°	97.43
10°	9.2	90°	526	106°	938	160°	6.10	240°	33.00	320°	111.46
20°	17.5	92°	567	108°	1004	170°	7.82	250°	39.21	330°	127.0
30°	31.8	94°	611	110°	1074	180°	9.90	260°	46.31	340°	144.2
40°	55.3	96°	658	115°	1268	190°	12.39	270°	54.30	350°	163.2
50°	92.5	98°	707	120°	1489	200°	15.34	280°	63.31	360°	181.1
60°	149.0	100°	760	130°	2.67	210°	18.83	290°	73.44	370°	207.6

§ 205. Технические применения. — Кипение под повышенным давлением (до 16 атмосфер) применяется в замкнутых паровых котлах для получения пара, потребляемого паровыми двигателями. Оно применяется еще в *автоклавах* [2]) — закрытых, снабженных предохранительным клапаном, прочных металлических сосудах, служащих для нагревания воды и других жидкостей до высоких температур. Автоклавы употребляются во многих химических производствах, напр., при фабрикации красок, при полу-

[1]) С помощью воздушного насоса нетрудно заставить кипеть слегка нагретую (примерно до 50°) и даже холодную воду, поместив ее под колокол насоса и выкачивая воздух.

Но можно обойтись и без воздушного насоса. Колбу наполняют водою до половины и нагревают до кипения; после нескольких минут кипения выделяющиеся пары унесут из колбы весь воздух; тогда плотно закрывают колбу резиновой пробкой, в то же время снимают ее с огня и опрокидывают, как показано на рис. 134. Скоро температура воды в колбе упадет ниже обыкновенной точки кипения. Но стоит положить на колбу снег или просто поливать ее холодной водой, чтобы внутри ее снова началось бурное кипение: в самом деле, охлаждение верхней половины колбы, содержащей пар, заставляет этот пар конденсироваться; давление над водой быстро падает, равновесие между водой и паром нарушается, и теплая вода под уменьшенным давлением закипает. Опыт можно повторять несколько раз без подогревания воды.

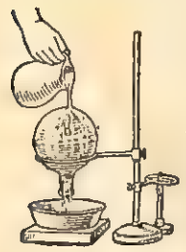

Рис. 134.

[2]) От autós (греч.) = *сам*, clávis (лат.) = *запор*.

чении стеариновой кислоты, при варке клея из кости, при приготовлении древесной массы в бумажном производстве.

Кипение под пониженным давлением осуществляется в так наз. *вакуум-апаратах* [1]) — металлических котлах, откуда насосом выкачивается сначала воздух, а потом пар. Вакуум-апараты употребляются для сушки обмоток электрических кабелей и вообще проводов, а в особенности — в некоторых химических производствах, напр., в сахарном: здесь требуется испарить лишнюю воду из свеклосахарного сока при низкой температуре, чтобы сахар не пригорал, а потому раствор кипятят под давлением ниже атмосферного.

§ 206. Перегонка. — Если мы имеем жидкость, содержащую в себе растворенное твердое вещество, или же имеем смесь жидкостей, то может возникнуть надобность отделить составные части раствора или смеси. Так, напр., иногда требуется из морской воды, содержащей соли, получить чистую воду (это делается на океанских пароходах; целый город Баку снабжается пресной водой, которая добывается из морской); нефть нужно бывает разделить на керосин, смазочные масла и бензин — продукты, имеющие различное применение; в винокуренном производстве из так наз. „бражки", содержащей 8 — 10% спирта, необходимо получить крепкий спирт. Подобные разделения производятся при помощи *перегонки* или *дестиляции* [2]). На рис. 135 изображен простой (лабораторный) дестиляционный прибор. В колбе B (которой в заводских приборах соответствует перегонный котел или „куб") кипит, напр., вода, содержащая растворенные твердые вещества; выделяющийся пар проходит через трубку T, окруженную муфтой J, через которую протекает холодная вода по направлению стрелок (это — „холодильник", здесь происходит конденсация паров); наконец, сосуд P есть „приемник", куда капает перегон (т.-е. перегнанная вода) в чистом виде.

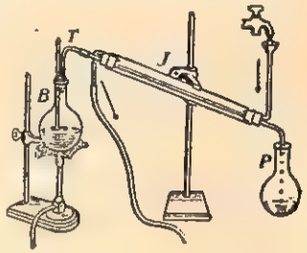

Рис. 135. Перегонный апарат.

Если речь идет о перегонке смесей жидкостей, дело бывает сложнее, так как перегон обыкновенно все еще представляет собою смесь, хотя и обогащенную одной из составных частей по сравнению с исходным материалом. Тут приходится производить перегонку несколько раз.

§ 207. Поглощение теплоты при парообразовании и выделение ее при конденсации. — Для того, чтобы обратить жидкость в пар без повышения температуры, необходимо израсходовать теплоту. Мы замечаем это в ряде явлений, например: а) для того, чтобы поддерживать кипение какой-нибудь жидкости под давлением атмосферным или более высоким, необходимо по-

[1]) Лат. vácuum = *пустота*.

[2]) От лат. слова destillo = *стекаю каплями*.

догревать ее, т.-е. постоянно сообщать ей теплоту; б) если жидкость закипает вследствие уменьшения давления, она быстро охлаждается, т.-е., за неимением внешних источников теплоты, отнимает теплоту у себя самой; в) при всяком парообразовании ощущается холод: если мы смочим участок своей кожи тонким слоем эфира, спирта или воды, мы чувствуем более или менее сильное охлаждение.

Наоборот, если пар конденсируется в жидкость той же температуры, то происходит выделение такого же количества теплоты, какое было бы затрачено на парообразование при той же температуре.

§ 208. Измерение теплоты парообразования воды. — **Скрытою теплотою парообразования называется то число калорий, которое должно быть затрачено для превращения единицы массы какой-либо жидкости, без повышения температуры, в насыщенный пар.** Если говорят, что теплота парообразования какого-нибудь вещества равна r, то это значит, что 1 грамм этого вещества, обращаясь из жидкости в пар, поглощает r малых калорий (а 1 килограмм — r больших калорий).

Вот как можно определить (не особенно точно) теплоту парообразования воды, кипящей под обыкновенным давлением.

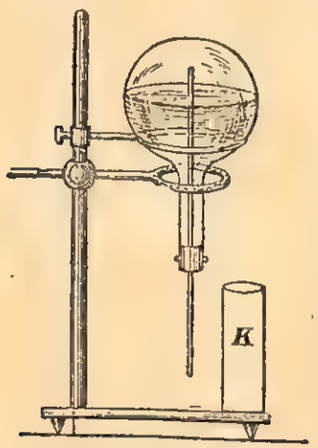

Рис. 136.

Колба, содержащая воду до половины, закрыта пробкой, через которую проходит трубка, немного не доходящая до дна; колбу помещают на штативе дном кверху (рис. 136) и нагревают с помощью кольцеобразной горелки. Когда вода закипит, снизу через трубку станет выходить пар, имеющий (приблизительно) 100°. Подставим под эту трубку калориметр K, содержащий M граммов холодной воды при температуре t°. Попадая в холодную воду, пар будет конденсироваться и отдавать воде скрытую теплоту. Через некоторое время уберем колбу и определим температуру воды в калориметре; пусть она будет θ°. Наконец, свесим калориметр и по увеличению его веса узнаем, сколько было введено пара (скажем, m граммов).

Теперь произведем следующий расчет: вода, бывшая первоначально в калориметре, получила $M(\theta - t)$ калорий; пар, введенный в калориметр, конденсируясь в воду с температурой 100°, отдал mr калорий (r означает теплоту парообразования воды при 100°); да еще, — охлаждаясь до θ°, образовавшаяся при конденсации вода отдала $m(100 - \theta)$ калорий. Итого отдано $mr + m(100 - \theta)$ калорий.

Приравнивая количество теплоты, полученное водой калориметра, и количество теплоты, отданное паром и образовавшеюся

из него водой, имеем уравнение $M(\theta - t) = mr + m(100 - \theta)$, откуда:

$$r = \frac{M(\theta - t)}{m} + \theta - 100.$$

Подставляя вместо M, m, t, θ известные числа, можем найти r.

Точные опыты показывают, что **теплота парообразования воды при 100° равна 539 калориям**: как видим, количество очень большое.

§ 209. Технические применения скрытой теплоты парообразования воды. — 1. Паровое отопление: по трубам, проведенным внутри здания, пропускают пар из котла с кипящей водой; конденсируясь в трубах, пар отдает им большое количество теплоты.

2. Паром и его скрытой теплотой пользуются для подогревания воды в сосудах, не приспособленных для непосредственного нагревания на огне (напр., в водопроводном баке бани).

3. Особенную важность для нагревания имеет пар высокого давления, температура которого выше 100°. Во многих химических производствах надобно нагревать вещества не выше определенного числа градусов (напр., 150°, 200°), иначе продукт пригорит и испортится. Нагревать на огне при таком условии было бы почти невозможно; а температура пара легко узнается по его давлению, за которым следят при помощи манометра. Вещества, нагреваемые паром, помещаются в замкнутые котлы с двойными стенками, при чем между стенками пропускают пар; а иногда пускают пар прямо внутрь котла, если примесь воды не вредит обрабатываемому веществу (как, напр., при варке мыла, при получении виноградного сахара из крахмала, при перегонке нефти).

§ 210. Таблица. — Следующая табличка содержит **значения теплоты парообразования r для разных жидкостей, когда они обращаются в пар под нормальным атмосферным давлением.** Рядом указана **температура кипения t° при том же давлении.**

	r	t°
Вода	539	100°
Этиловый спирт	205	78,2°
Этиловый эфир	88	35°
Жидкий хлор	70	—34°
Ртуть	64	358°
Жидкий кислород	51	—182°
Жидкий азот	48	—195°

Чем ниже точка кипения жидкости, тем легче жидкость испаряется и тем большее давление пара дает при данной температуре. Это можно видеть на опыте рис. 133: здесь в трубку № 3 введена вода, она дает при обыкновенной температуре давление в 1—2 cm ртути; в трубке № 2—спирт, давление пара 4—5 cm; наконец, в трубке № 1—эфир (давление около 40 cm). Жидкости, легко испаряющиеся (как эфир), называются *летучими*.

§ 211. Пар насыщенный и перегретый. — Пар, который способен оставаться в равновесии со своей жидкостью, называется **насыщенным.** В паровых котлах, в верхней части колбы с кипящей водой, в опытах, показанных на рис. 132 и 133, мы имеем насыщенный пар.

Кроме того, пар может быть в *перегретом* состоянии. Чтобы понять различие между паром насыщенным и перегретым, вообразим такой опыт. Пусть мы имеем в цилиндре под поршнем 1 kg воды, прокипяченной и, значит, не содержащей воздуха. Снаружи на поршень пусть действует постоянное давление (скажем, нормальное атмосферное, равное $1.033 \frac{kg}{cm^2}$). Пусть начальная температура воды, напр., 0°. Будем сообщать теплоту воде, подогревая цилиндр; при этом будем следить за изменениями температуры и объема, занятого веществом в цилиндре. Изменение объема будем отмечать на графике, при чем на горизонтальной оси будем откладывать объемы, а на вертикальной — давления (рис. 137). Начальное состояние нашей воды отметим некоторой точкой a, при чем $am = 1 \frac{kg^*}{cm^2}$, а $Om = 1\ dm^3$. В момент, когда температура воды достигнет 100°, объем ее увеличится, примерно, на 4% против начального; такой незначительный прирост невозможно верно передать на графике малого масштаба, поэтому *условно* выразим состояние воды, доведенной до 100°, точкой A. Отрезок OM будет выражать объем воды в этом состоянии.

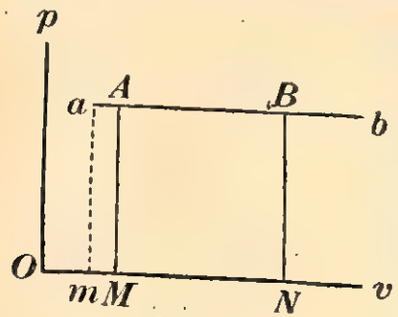

Рис. 137.

Очевидно, произведенная затрата теплоты равняется теперь 100 калориям. Будем еще сообщать теплоту нашему цилиндру; температура внутри его уже не будет повышаться, а вся сообщаемая теплота будет затрачиваться на парообразование. Теперь внутри цилиндра мы будем иметь жидкость и *насыщенный* пар (подобно тому, как в паровом котле). Опыт показывает, что выделяющийся из воды пар способен уносить с собой мелкие капельки воды, которые, как туман, носятся в атмосфере пара. Такая смесь пара с туманом называется *влажным* или *мокрым* паром.

Чем больше скрытой теплоты взято нашей системой[1]), тем меньше жидкости останется в цилиндре, тем большее количество пара будет в нем, и тем больший объем будет занимать наша система. Когда, кроме 100 калорий, затраченных на нагревание воды, мы израсходуем еще 539 калорий, тогда вся взятая вода обратится в пар; это все еще будет *насыщенный* пар при 100°, но пар *сухой* (т.-е. не содержащий воды). Объем, занимаемый одним

[1]) *Системой* в учении о теплоте называют тело или совокупность тел, воспринимающих или отдающих теплоту.

килограммом сухого насыщенного водяного пара при 100°, равен 1670 dm^3. Это число слишком велико, чтобы мы могли верно отметить его на нашем графике; поэтому опять отметим его *условно* точкой B. Горизонтальная прямая AB представляет процесс постепенного парообразования при данном давлении.

Что будет, если к полученному сухому пару мы будем еще подводить теплоту, сохраняя давление попрежнему постоянным? Оказывается, его температура теперь будет *повышаться*. Вот в этом-то состоянии пар называется **перегретым.** Занимаемый им объем будет *больше, чем объем насыщенного пара*[1]); при чем зависимость объема от температуры приблизительно соответствует, как для газов, закону Ге-Люсака. Перегретый пар не мог бы быть в равновесии со своей жидкостью; если бы мы примешали к нему небольшое количество жидкости, она немедленно испарилась бы; при большем количестве жидкости пар превратился бы в насыщенный.

На графике состоянию перегретого пара будет соответствовать неопределенно продолжающаяся прямая Bb.

Если бы мы стали *отнимать* теплоту от нашей системы (начав с перегретого пара), можно было бы провести процесс в обратном порядке, по линии ba.

§ 212. Работа пара. — Очевидно, что в процессе aABb наша система поглощая теплоту, производит работу (потому что сила давления системы двигает поршень). Выразим количество работы, совершаемой килограммом пара в процессе AB.

Пусть будет p то постоянное давление, под которым находится наша система, графически изображаемое отрезком AM и равное давлению пара. Площадь поршня пусть будет S. Пусть в процессе парообразования (отрезок AB на графике) поршень переместился на расстояние l. Так как сила пара, действующая на поршень, есть $p \times S$, то работа пара будет $T = p \times S \times l$. Но $S \times l$, очевидно, есть объем, пройденный поршнем за время процесса AB; это — приращение объема системы, графически выражаемое отрезком MN. Работа пара графически выразится произведением $AM \times MN$, т.-е. площадью прямоугольника MABN. Алгебраически же эту работу можно выразить так: $T = p\ (v_2 - v_1)$, где $v_2 = ON$ есть объем сухого насыщенного пара, а $v_1 = OM$ — объем жидкости, нагретой до кипения. При атмосферном давлении (см. предыдущий §) мы получим: $T = 1.033 \frac{kg^*}{cm^2} \times (1670 - 1)\ dm^3$. Но чтобы работа получилась в привычных нам единицах — килограммметрах, очевидно, нужно выражать давления не в $\frac{kg^*}{cm^2}$, а в $\frac{kg^*}{m^2}$, объемы — не в dm^3, а в m^3. Сделаем соответствующие преобразования. Легко понять, что давление в 1.033 kg* на 1 cm^2 — все равно, что давление в 10330 kg* на 1 m^2; поэтому имеем $T = 10330 \frac{kg^*}{m^2} \times 1.669\ m^3 = 17240$ kgm.

[1]) Отсюда следует, что при данном давлении пар бывает всего плотнее если он насыщен.

Если бы давление p менялось в течение процесса, то графическим изображением процесса была бы какая-нибудь кривая, напр., CD (рис. 138). Такой случай сводится к предыдущему. В самом деле, разобьем весь процесс на малые участки CE, EF и т. д., и рассмотрим какой-нибудь из них, напр., первый. Работу пара в процессе CE мы можем легко высчитать, если предположим, что давление в этом процессе не изменялось от значения MC до значения NE, а сохраняло *среднее* значение MH; тогда работа в процессе CE выразится произведением MH × MN, т.-е. площадью прямоугольника MHIN. На всем процессе CD работа выразится площадью ступенчатой фигуры MHIKL....QRP Это рассуждение будет тем вернее, чем мельче те участки, на которые мы разбиваем процесс. В пределе выйдет, что **работа пара выражается в осях vp площадью, которая ограничена: дугой, изображающей процесс; перпендикулярами, опущенными на ось объемов из концов дуги; отрезком оси объемов.** Эта истина имеет чрезвычайно важное значение при подсчете работы поршневых машин.

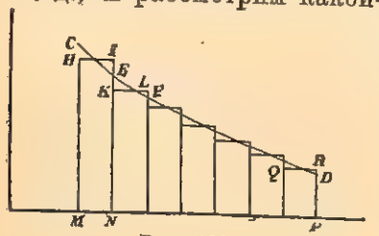

Рис. 138.

Если бы процесс шел в обратном направлении (не по CD, а по DC), то работа не выделялась бы поршнем, а наоборот — поглощалась бы им. Работу производили бы тогда какие-то внешние силы

§ 213. Таблица. — В помещаемой ниже таблице приведены следующие данные для воды при разных давлениях p:

температура кипения — t°,

объем одного килограмма жидкости, доведенной до кипения — v_1,

объем одного килограмма насыщенного пара — v_2,

скрытая теплота парообразования — r.

p в $\frac{kg^*}{cm^2}$	t°	v_1 в dm^3	v_2 в dm^3	r
0.1	45°.6	1.01	14920	570
0.5	80°.9	1.03	3924	550
1	99°.1	1.04	1722	540
2	119°.6	1.06	901.6	527
3	132°.8	1.07	616.3	518
4	142°.8	1.08	470.8	511
5	151°.0	1.09	382.0	505
6	157°.9	1.10	322.0	500
8	169°.5	1.11	245.8	492
10	178°.9	1.13	199.3	485
12	186°.9	1.14	167.8	478
14	194°.0	1.15	145.15	472
16	200°.3	1.16	128.0	467

Мы видим из этой таблицы, что объем 1 kg закипающей воды с повышением давления слабо увеличивается, объем 1 kg насыщенного пара сильно уменьшается (значит, плотность пара сильно увеличивается). Скрытая теплота парообразования с повышением температуры кипения заметно уменьшается.

На основании этих данных читатель легко может высчитывать, как в § 212, работу пара при разных давлениях.

§ 214. Диаграма состояния. — Если бы перенести эти данные на график или, как чаще здесь выражаются, на диаграму [1]), получилось бы нечто вроде рис. 139.

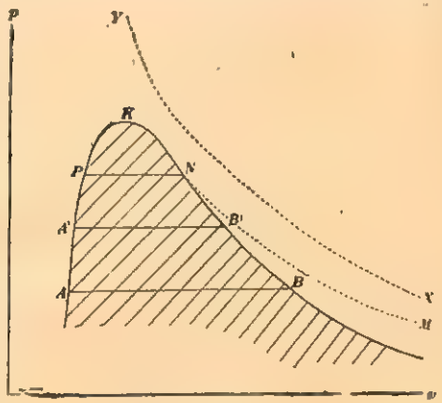

Рис. 139.

Область изменения переменных величин, в которой может существовать и жидкость и насыщенный пар, имеет вид языка, суживающегося кверху; на графике она заштрихована. Направо от этой области может существовать только перегретый пар; налево — только жидкость. Если мы на нашей диаграме вообразим одну MN из тех *гипербол*, о которых говорилось в § 166, то придется сделать следующую оговорку: эти гиперболы графически изображают изменения состояния газа (при постоянной температуре) лишь в той области, которая соответствует перегретому [2]) пару (действительно, газы, в том числе воздух, суть не что иное, как перегретые пары некоторых весьма летучих жидкостей). В точке N подобной гиперболы газ уже становится насыщенным паром; отсюда, уменьшая отведенный ему объем при постоянной температуре и постоянном давлении, мы заставим его конденсироваться в жидкость, и в точке P у нас будет только одна жидкость.

Точка K, высшая точка заштрихованной области, называется **критической**. Давление и температура, соответствующие этой точке, суть наивысшее („критическое") давление и наивысшая („критическая") температура, при которых могут происходить явления парообразования и конденсации. В критической точке различие между жидкостью и паром исчезает; скрытая теплота парообразования обращается при критическом давлении в нуль.

§ 215. Конденсация газов. — Из сказанного в предыдущем § делается понятным, при каком условии возможно конденсировать газ в жидкое состояние. Для этого прежде всего необходимо, чтобы температура газа сделалась ниже критической;

---

1) Греч. diágramma = *рисунок*.
2) И сухому насыщенному.

если температура его будет выше критической, то, прилагая к нему все бо́льшие давления и уменьшая его объем, мы все же пройдем мимо области АКВ (напр., по гиперболе XY) и, значит, никогда не получим признаков конденсации.

Когда температура газа ниже критической, то для превращения его в жидкость можно применить два средства: или охладить газ еще более, или же сдавливать его. Можно также комбинировать оба средства вместе. В следующей табличке приведены критические температуры t_k некоторых веществ и, для сравнения, температуры кипения их под нормальным атмосферным давлением t:

Веществ	t_k	t
Водород	— 234°	— 252°
Азот	— 146°	— 195°
Кислород	— 118°	— 183°
Углекислота	31°	— 78°
Амиак	131°	— 33°
Хлор	145°	— 35°.6
Этиловый эфир	194°	35°
Этиловый спирт	242°	78°
Вода	374°	100°

Поэтому, чтобы обратить в жидкость, скажем, кислород, необходимо его охладить ниже —118°; тогда, прилагая достаточное давление, получим жидкий кислород. Если теперь эту жидкость освободить от давления, напр., оставить на открытом воздухе, она станет кипеть; и так как скрытая теплота парообразования жидкого кислорода довольно значительна, то это кипение продолжается довольно долго. Необходимую для кипения теплоту жидкость будет брать между прочим от себя самой, вследствие чего ее температура упадет еще гораздо ниже (до —183°). Таким образом мы видим, что превращение газов в жидкое состояние является средством к получению низких градусов холода.

В настоящее время многие газы обращаются в жидкое состояние фабрично-заводским способом. В особенности много добывается жидкой углекислоты (она идет главным образом для изготовления шипучих напитков). Большие количества газообразной углекислоты добывают, прокаливая некоторые минералы (магнезит, известняк). Добываемый газ вгоняют насосами в крепкие стальные цилиндры, где он остается в жидком состоянии под давлением около 50—60 атмосфер (при комнатной температуре).

ГЛАВА XX.

Тепловые двигатели и холодильные машины.

§ 216. Взаимная превращаемость теплоты и механической энергии. — Весьма часты случаи, когда механическая энергия затрачивается, а взамен ее появляется теплота. Это бывает при **трении**, при **сжатии** и при **ударе**.

Примеры развития теплоты при трении: 1) пилы, ножи, бурава нагреваются во время работы; 2) подшипник и шейка вала, вращающаяся в нем, могут нагреваться (в больших машинах) так сильно, что требуется постоянно охлаждать подшипник водой.

Примеры развития теплоты при сжатии: 1) кусок свинца, будучи сжат гидравлическим прессом, нагревается; 2) при нагнетании газа в какой-нибудь приемник (напр., воздуха — в камеры велосипедных и автомобильных шин), температура газа повышается. Если быстро вогнать поршень в цилиндр, содержащий воздух при 20°, так чтобы объем этого воздуха уменьшился в 10 раз, то температура воздуха повышается до 470°.

Примеры развития теплоты при ударе: 1) шляпка гвоздя нагревается при быстро следующих один за другим ударах молотка; 2) другой весьма поучительный пример мы встретим в следующем §.

С другой стороны, нередки случаи, когда потребляется теплота, а получается механическая работа. Такое превращение осуществляется разнообразными тепловыми двигателями. Мы только что встретили случай подобного превращения, рассматривая процесс парообразования (§ 212).

§ 217. Лабораторная работа № 22. — *Определить, сколько теплоты получается при затрате 1 килограммметра механической энергии.*

Необходимые предметы: 1) картонная трубка, длиною около 1 m, диаметром около 8 cm, с одного конца имеющая прочно приделанное дно, с другого конца плотно запираемая деревянной пробкой; 2) термометр, вставленный в канал просверленный по оси деревянной пробки, подходящей по размеру к трубке; нижняя часть термометра выступает из пробки примерно на 5 cm; 3) около двух килограммов мелкой свинцовой дроби в жестяном сосуде; 4) метровый масштаб; 5) смесь льда с водой.

NB. Внутренность трубки, деревянные пробки и дробь должны быть вполне сухи.

Способ выполнения. — 1) Осторожно погрузить термометр в дробь (примерно до глубины в 5 cm). Затем поместить сосуд с дробью в ледяную воду и держать его здесь, пока температура дроби не упадет на 5° — 6° ниже комнатной температуры [1]).

2) Пересыпать дробь в трубку и плотно запереть последнюю сплошной пробкой. Потрясти трубку и несколько (5—10) раз опрокинуть ее из стороны в сторону, чтобы дробинки хорошо перемешались и приняли равномерную температуру.

1) Можно производить опыт, не прибегая к предварительному охлаждению дроби. Но тогда погрешность окончательного результата будет гораздо больше.

3) Заменить сплошную пробку просверленной пробкой с термометром. Постепенно наклонять трубку и, наконец, привести ее в такое положение, чтобы резервуар термометра был весь покрыт дробью.

4) В этом наклонном положении оперсть трубку о край стола и вращать ее около ее геометрической оси примерно в течение 2 минут, следя за термометром. Если температура дроби отличается от комнатной температуры более чем на 3°, то снова повторить перемешивание дроби, опрокидывая трубку. Когда температура дроби будет на 2°—3° ниже комнатной температуры, заметить и записать ее температуру (t) с точностью до десятых долей градуса.

5) Переменить положение трубки так, чтобы дно ее было несколько ниже другого конца. Быстро вынуть пробку с термометром и вместо нее вставить сплошную пробку. Поставить трубку вертикально так, чтобы дно ее опиралось о стол или о табурет. Быстро повернуть трубку дном кверху так, чтобы теперь она опиралась о стол пробкой. Когда вся дробь упадет вниз, тотчас же снова перевернуть трубку и т. д. Сделать всего 100 таких опрокидываний.

6) Быстро заменить верхнюю пробку пробкой с термометром, привести трубку в наклонное положение и, оперши ее о край стола, вращать ее, как в № 4; в то же время следить за термометром. Отсчитать с точностью до десятых долей наивысшую температуру t', которую покажет термометр; это будет температура дроби.

7) Определить высоту, с которой падала дробь при каждом опрокидывании трубки (эта высота равна длине пустого цилиндрического пространства внутри трубки).

8) Почему, при быстром опрокидывании трубки, дробинки не соскальзывают вдоль стенок раньше, чем они окажутся в самом верху трубки? Сколько потенциальной энергии теряют P kg дроби, падая с высоты h метров? Во что превращается эта энергия? Сколько килограмметров энергии подвергнется превращению в течение 100 опрокидываний?

9) На сколько градусов повысилась температура дроби? Сколько калорий необходимо для этого, если теплоемкость свинца 0.031?

10) Почему мы имеем право допустить, что вся затраченная дробью потенциальная энергия пошла на нагревание дроби? (Благодаря предварительному охлаждению дроби на столько же приблизительно градусов против комнатной температуры, на сколько затем она нагревается, влияние теплопроводности и излучения можно считать исключ нным.)

11) Высчитать, скольким килограмметрам „эквивалентна“ [1]) одна большая калория.

§ 218. Эквивалентность механической энергии и теплоты. — Точными опытами ученые нашли, что если при затрате

[1]) От лат. слов aéque = *равно*, válens = *сильный*.

механической энергии возникает теплота, то количество этой теплоты — строго определенное: взамен каждого затраченного килограмметра получается $\frac{1}{427}$ большой калории (это — „тепловой эквивалент килограмметра“); и равным образом — если при затрате теплоты получается механическая энергия, то **каждая затраченная большая калория дает 427 килограмметров** (это — „механический эквивалент калории“). Эта эквивалентность убедительно доказывает, что **теплота есть форма энергии.**

Мы знаем (§ 102), что 1 kgm = 0.0098 kJ или 9.8 J; отсюда вытекает, что большая калория эквивалентна 427 × 9.8 J, а **малая калория эквивалентна** $\frac{427 \times 9.8}{1000} = 4.18$ **джоулям.** Обратно: **джоуль эквивалентен 0.24 малой калории.**

§ 219. Паровая машина. — Машины, превращающие тепловую энергию в механическую, называются **тепловыми двигателями.** Те из тепловых двигателей, в которых используется тепловая энергия пара, называются **паровыми машинами.** Паровые машины разделяются на **поршневые машины** и **турбины** (см. стр. 8). Мы рассмотрим здесь простую схему поршневой машины (рис. 140, также 141).

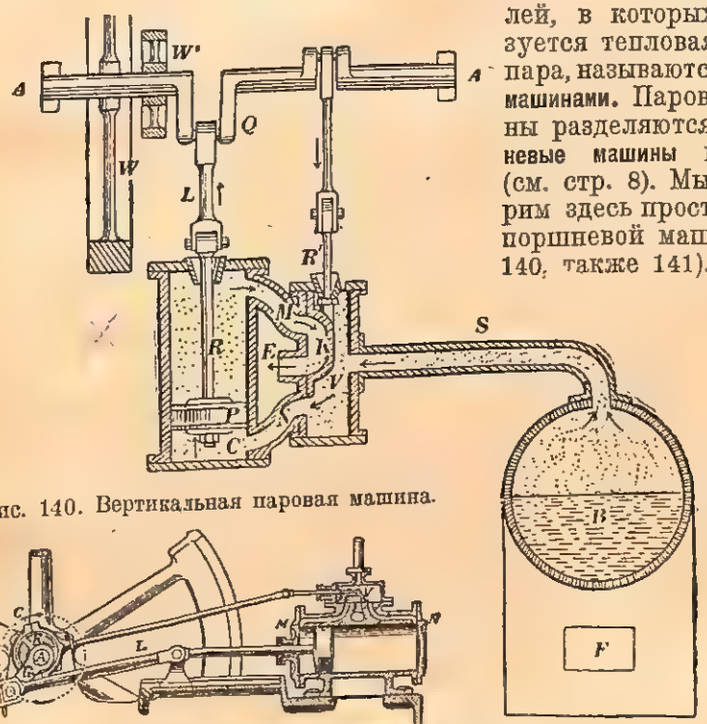

Рис. 140. Вертикальная паровая машина.

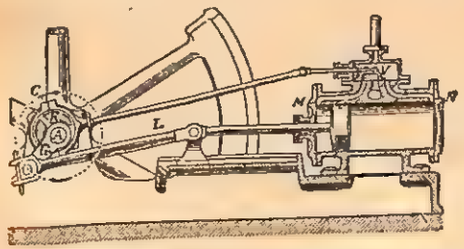

Рис. 141. Горизонтальная паровая машина.

Над топкой F находится котел B, в котором образуется пар. Из котла пар идет по трубке S в „золотниковую коробку“ V, а отсюда через канал N в „цилиндр“ C; здесь пар своим давле-

нием заставляет поршень P двигаться кверху. Поступательное движение поршня и его „скалки“ или „штока“ R через посредство „шатуна“ L и „кривошипа“ Q приводит вал AA во вращательное движение. При этом, по мере того, как поршень идет кверху, скалка (шток) R′, соединенная подобным же шатуном и кривошипом с AA, идет книзу. Она передвигает книзу прикрепленный на конце ее „золотник“ K; и когда поршень займет свое самое высокое положение, золотник K прекратит сообщение золотниковой коробки с цилиндром через N, но зато откроет сообщение через M. Тогда пар, давя на поршень сверху, заставит его двигаться книзу, и т. д.

Чтобы поршень свободно двигался вверх и вниз, нужно, чтобы он не испытывал сопротивления со стороны „отработавшего“ или „мятого“ пара. Это достигается тем, что отработавший пар выпускают из цилиндра через внутреннее пространство золотника и через трубку E. В положении, изображенном на рис. 140 и 141, отработавший пар выходит через канал M.

В то время как поршень совершает одно полное движение в ту и другую сторону, вал машины делает один оборот.

При помощи шкива W′ вращение вала можно передать каким угодно другим машинам.

Маховое колесо W служит для поддержания равномерности хода паровой машины [1]).

§ 220. Машины с холодильником и без холодильника. — В большинстве паровых машин, установленных неподвижно, трубка E соединяется с „конденсатором“ или „холодильником“ (рис. 143), состоящим из камеры Q, куда вбрызгивается струя холодной воды T и откуда вода высасывается через трубку G.

Благодаря такому устройству, давление отработавшего пара на поршень бывает мало (в лучших машинах не более 30 — 50 mm

---

[1]) Без махового колеса ход паровой машины был бы чрезвычайно неравномерным по двум причинам. Во-первых (как легко сообразить по правилу параллелограма сил), вращающий момент, с которым поршень действует на вал, не одинаков при различных положениях шатуна и кривошипа. Иногда этот момент бывает равен нулю, а именно — когда шатун и кривошип лежат на одной прямой линии, в так называемом „мертвом положении“. Машина проходит через эти положения по инерции, для увеличения которой и служит маховик. Если же случится, что машина была остановлена как раз в мертвом положении, то при пуске пара она сама не может пойти в ход: приходится руками повернуть маховик до четверти оборота. Когда маховик бывает неприменим (как, напр., на паровозах), тогда устраивают у машины два цилиндра, при чем кривошипы ставят под прямым углом друг к другу (рис. 142). В этом случае один поршень будет развивать наибольший вращающий момент как раз в ту пору, когда шатун и кривошип другого поршня находятся в мертвом положении.

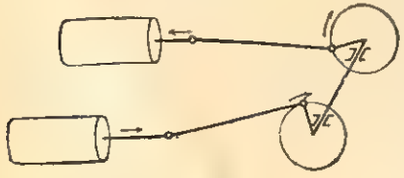

Рис. 142.

Другая причина неравномерности хода машины зависит от неравномерного давления пара в машинах с расширением (§ 223).

ртутного столба); оно легко преодолевается давлением пара, приходящего из котла, даже если давление этого пара равняется всего 1 атмосфере.

Однако присоединение холодильника к машине делает ее значительно более тяжелой и сложной; поэтому если от машины требуется, прежде всего, легкость и небольшая величина (как, напр., на паровозах), то холодильника не устраивают, а выпускают отработавший пар прямо в воздух. Понятно, что если при этих условиях желают получать от машины ту же полезную работу, то питающий ее пар должен иметь упругость приблизительно на 1 атмосферу больше, чем при наличии холодильника.

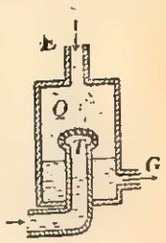

Рис. 143.

§ 221. Эксцентрик. — На рис. 140 мы видим, что устройство кривошипа Q заставляет делать вал изогнутым. Чтобы избежать необходимости делать второй изгиб для кривошипа, приводящего в движение золотник, придают этому кривошипу особое устройство, а именно, закрепляют неподвижно на валу кружок K (рис. 141), центр которого не совпадает с центром вала A; его охватывает кольцо, соединенное с шатуном золотника V. Такой кривошип называется **эксцентриком.**

§ 222. Регулятор. — На рис. 144 изображен центробежный „регулятор“, — прибор, служащий для того, чтобы скорость хода машины оставалась постоянной. Он представляет собою стержень, которому передается вращение от вала машины, на стержне с помощью сочлененного параллелограма висят два массивных шара B, B. Если ход машины станет ускоряться, то шары вследствие инерции отойдут дальше от оси вращения, и в то же время поднимутся вверх; поднимется и муфта, находящаяся в нижней вершине параллелограма. Эта муфта соединена рычагами с заслонкой, помещенной в трубе, которая соединяет котел с золотниковой коробкой; если муфта поднимется кверху, то заслонка несколько прикроет отверстие трубы, и в цилиндр станет поступать меньшее количество пара, поэтому дальнейшее ускорение хода машины прекратится.

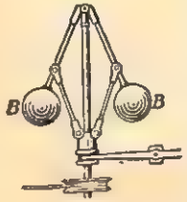

Рис. 144.

Обратное произойдет, если ход машины станет замедляться.

§ 223. Машина с расширением пара. — При описании действия паровой машины в § 219 мы предположили, что пар из котла выпускается в цилиндр на всем протяжении хода поршня, и, значит, все время действует на поршень полным своим давлением p. Если V есть объем, описанный поршнем между двумя крайними положениями, то работа, совершонная силою пара, будет pV. На каждый килограмм затраченного пара работа будет $p(v_2 - v_1)$, где v_2 есть объем 1 kg пара, v_1 — объем 1 kg воды (см. § 212). Эта работа эквивалентна $\frac{p(v_2 - v_1)}{427}$ большим калориям.

Сопоставим полученную таким образом работу с тем количеством теплоты, которое расходуется на нагревание 1 kg воды от 0° до точки кипения и на превращение ее в пар упругости p, и которое численно равно t + r большим калориям. Это сопоставление на основании данных § 213 сделано для трех значений p в следующей табличке.

p	$\frac{p(v_2 - v_1)}{427}$	t + r
2	42.1	647
8	45.9	661
14	47.2	666

Мы видим, что при таких условиях превращалась бы в работу всего примерно $^1/_{15}$ часть теплоты, потраченной на нагревание воды и на парообразование (не принимая во внимание еще целого ряда неизбежных потерь энергии). Мы видим также, что применение пара высокого давления не давало бы почти никакой выгоды против пара низкого давления.

Оказывается, можно заставить пар совершить большую добавочную работу, если впускать его в цилиндр только на некоторой доле хода поршня, а затем при помощи соответственно расчитанного золотника прекращать сообщение цилиндра с котлом. После такой „отсечки" пар будет иметь упругость еще гораздо бо́льшую, чем упругость отработавшего пара по другую сторону поршня. Поэтому поршень будет продолжать двигаться в прежнем направлении под давлением постепенно расширяющегося пара [1]).

Диаграма работы пара, начерченная в осях vp, будет иметь при этих условиях вид, показанный в верхней части рисунка 145. Здесь отрезок ab означает объем, описанный поршнем под полным давлением пара; bc есть кривая расширения пара. При обратном ходе поршня, когда пар, работавший только что, сразу уменьшает свое давление до величины давления в холодильнике, поршню придется *затрачивать* работу на выталкивание отработавшего пара. Эта работа выразится нижней частью рис. 145. Будет проще, если мы не станем чертить эти две диаграмы порознь, а прямо отрежем от верхней диаграмы часть, соответствующую нижней диаграме. Тогда остаток, изображенный на рис. 146 в заштрихованном виде, сразу даст нам

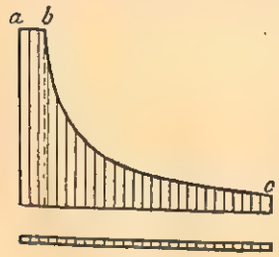

Рис. 145.

Рис. 146.

[1]) Приток пара остается отсеченным до самого конца движения поршня; а перед самым концом золотник закрывает также выход отработавшему пару, так что теперь остаток его будет сжиматься поршнем. Это приносит ту пользу, что уменьшается толчок при перемене направления движения поршня.

работу, производимую машиной при одном *полном* ходе поршня вперед и назад.

§ 224. Паровоз (рис. 147) движется посредством паровой машины, построенной на манер рис. 142 (так что с каждой стороны паровоза находится по одному цилиндру) и вращающей „ведущие" колеса Dw. С каждой стороны бывает 2, 3, даже 5 ведущих колес. Кривошипы задних колес „сцепным дышлом" Sr соединяются с передними кривошипами, а эти—с шатуном Cr. В показанном на рисунке положении поршень движется влево, следовательно колеса вращаются по часовой стрелке, а паровоз движется вперед.

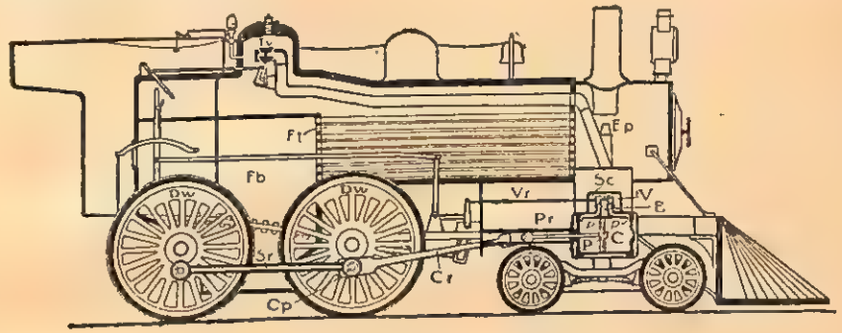

Рис. 147. Устройство паровоза.

Названия частей:

Fb—огневая коробка.
Ft—дымогарные трубки.
Tv—выпускной паровой клапан.
Sc—золотниковая коробка.
V—золотник.
pp—входные каналы для пара.
C—цилиндр.
P—поршень.
E—выпускной канал.
Ep—форсовой конус.
Vr—золотниковый шток.
Pr—поршневой шток.
Cr—шатун.
Cp—палец кривошипа.
Sr—сцепное дышло.
Dw—ведущие колеса.

Паровоз в работе употребляет ежечасно от 3 до 15 тонн пара; для образования такого огромного количества пара площадь соприкосновения котла с пламенем должна быть очень велика. С этой целью паровозному котлу дают особое устройство: он бывает пронизан большим числом „дымогарных трубок" Ft, по которым протекают горячие газы из топки и сильно нагревают воду.

Для того, чтобы усилить пламя, необходима сильная тяга. С этой целью струя отработавшего пара, выходящая из-под золотника, выпускается через „форсовой конус" Ep в дымовую трубу.

§ 225. Расчет мощности паровоза.—Положим, что товарный паровоз должен тащить поезд из 30 вагонов весом по 14 t каждый (всего 420 t) со скоростью в 25 $\frac{km}{h}$ на уклоне в $^1/_2$%.

Пусть собственный вес паровоза—45 t, вес тендера с углем и водой—30 t. Итого, машина должна тащить 495 t. Согласно опытам можно принять, что при скорости $25 \frac{km}{h}$ полное встречаемое поездом сопротивление (как от трения, так и от сопротивления воздуха) составляет 6 kg* на каждую тонну веса поезда. В таком случае при движении по горизонтальному пути сила тяги, равная этому сопротивлению, должна составлять $495 \times 6 = 2970$ kg*. Кроме того, для подъема на уклон машина должна развивать силу, составляющую $\frac{1}{200}$ силы тяжести поезда, или $495000:200 = 2475$ kg*. Итого, необходимая сила тяги $2970 + 2475 = 5445$ kg*[1]). Помножив эту силу на (секундную) скорость, узнаем мощность. Скорость равна $\frac{25000}{3600} \frac{m}{sec} = 7 \frac{m}{sec}$, откуда мощность $= 5445 \times 7 \frac{kgm}{sec}$ или $\frac{5445 \times 7}{75} = 510$ лош. сил. Но так как из работы пара непроизводительно тратится до 20%, то мощность машины надо принять по крайней мере в 600 HP.

§ 226. Машины компаунд. — Мы видели, что для более полного использования энергии пара необходимо дать пару расшириться в цилиндре машины. Естественно подумать, что это расширение должно продолжаться до тех пор, пока работающий пар не приобретет ту самую упругость, которая имеется в холодильнике, т.-е. около 0.15 атмосферы, так как тогда, выпуская его в холодильник, мы уже взяли от него всю энергию, какую можно взять. На самом деле доводить расширение пара высокого давления до такого предела было бы невыгодно: пришлось бы придать цилиндру непомерную длину, да и небольшой выигрыш работы при последних стадиях расширения целиком уходил бы на преодоление трения поршня. Поэтому *укорачивают расширение*: открывают выпуск пара из цилиндра тогда, когда его упругость еще значительно больше упругости в холодильнике (это хорошо видно на рис. 145 и 146). Но так как отработавший пар при этих условиях может сохранять еще значительное количество энергии, то *впускают его в другой цилиндр*, устроенный совершенно так же, как первый, но только имеющий бо́льшие размеры, так как в него входит пар уже сильно расширившийся и, значит, занимающий большее пространство. Иногда соединяют таким образом „последовательно" три цилиндра. Такие машины носят название **компаунд**[2]); иначе они называются машинами *с двойным, тройным расширением*. Они особенно часто употребляются на пароходах.

---

[1]) В настоящее время строятся (в Америке) паровозы, дающие силу тяги 60000 kg* и даже больше.

[2]) Англ. слово compound = *сложный*.

Устройство цилиндров машины компаунд схематически показано на рис. 148. Пар, совершивший работу в цилиндре высокого давления A, через кран D_2 идет в цилиндр низкого давления B, а отсюда через E_2 выходит или в третий цилиндр, или в холодильник. Краны C_1, C_2, D_1, D_2, E_1, E_2, играющие в парораспределении ту же роль, что и золотники, отворяются и затворяются в нужную пору самой машиной.

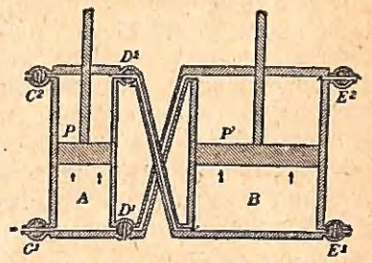

Рис. 148. Машина компаунд.

Пар в A может вступать, напр., с упругостью в 7 атмосфер и выходить оттуда с упругостью в 2 атмосферы; в цилиндре B упругость его может падать от 2 до 0.15 атмосфер.

§ 227. Полезное действие паровых машин. — Действие паровой машины вкратце сводится к тому, что *часть* тепловой энергии пара, приходящего из котла, превращается в механическую работу, а остальная часть отдается холодильнику (или воздуху, если нет особого холодильника). Эта часть, можно сказать, теряется непроизводительно; она идет в „отброс"[1]).

Если мы возьмем отношение тепла, эквивалентного полученной механической работе, ко всей теплоте, отдаваемой паром, то такое отношение можно будет назвать *коефициентом полезного действия* машины.

Специальная наука, изучающая законы превращения тепла в работу и называемая *Термодинамикой*, доказала, что при наиболее совершенном устройстве паровой машины этот коефициент выражается такой формулой:

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 + 273},$$

где t_1 — температура пара в котле, t_2 — температура холодильника. Таким образом полезное действие паровой машины в *идеальном случае* зависит только от температуры котла и холодильника.

Возьмем числовой пример. Пусть температура пара, питающего машину высокого давления, равна 180°, температура холодильника равна 50°. Тогда $\eta = 29\%$.

Возьмем другой пример. Машина низкого давления получает пар температуры 115°, холодильник имеет 35°. Тогда $\eta = 21\%$.

Мы видим, что *даже в идеальном случае* количество тепла, превращенного в работу, составляет лишь около $^1/_4$ части того тепла, которое было затрачено на получение пара. *Остальные же $^3/_4$ потраченного тепла теряются непроизводительно.*

---

[1]) Можно сравнить питание паровой машины с питанием живого существа. Далеко не вся материя и энергия пищи идет на создание тканей живого организма и на производство им работы; значительная часть попадает в отбросы.

Фактическое положение дела еще гораздо менее утешительно, так как большее или меньшее количество энергии теряется: 1) вследствие того, что топочные газы улетают в дымовую трубу, имея еще очень высокую температуру, и уносят с собою очень большое количество энергии, 2) вследствие теплопроводности и излучения топки, котла и машины, 3) вследствие вредных сопротивлений в самой машине. Поэтому неудивительно, что если рассчитывать коефициент полезного действия не по отношению к теплоте пара (как это выше сделано), а по отношению к тепловой энергии топлива, то он оказывается весьма малым, а именно:

для самых лучших машин тройного расширения с холодильником—не свыше 17%;
для обыкновенных паровозов 8%;
для малых машин не свыше . . . . . 2%.

Несколько бо́льший коефициент полезного действия, сравнительно с поршневыми машинами, дают паровые турбины (рис. 3).

§ 228. Двигатели с внутренним горением.— Чтобы избавиться от потерь теплоты в паровом котле, в трубопроводе, а также, чтобы уменьшить потери в дымовой трубе, стали сжигать топливо в самом цилиндре, под поршнем, при чем газообразные продукты горения своим давлением производят работу

Действие такого „двигателя с внутренним горением“ можно понять из рис. 149. Здесь отдельно показаны четыре фазы, или „такта“, из которых состоит один полный период машины.

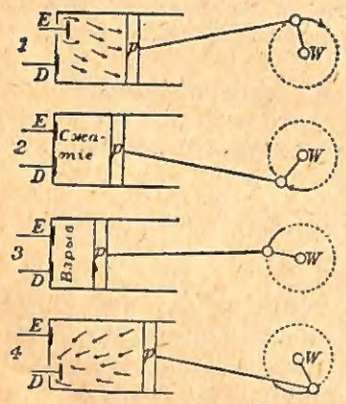

Рис. 149.

Положим, что маховое колесо W приведено во вращение (хотя бы руками). Когда поршень p движется направо (такт 1), открывается клапан E, и через отверстие в цилиндр всасывается взрывчатая смесь светильного газа и воздуха. Когда поршень при дальнейшем вращении колеса, идет налево (такт 2), клапан E закрывается, и газовая смесь сжимается в малом пространстве в левом конце цилиндра. Тогда электрическая искра от маленькой магнито-электрической машинки („магнето“) воспламеняет эту смесь (такт 3), и сила взрыва толкает поршень вправо, сообщая тем самым бо́льшую скорость колесу. Когда же поршень станет возвращаться обратно (такт 4), открывается выпускной клапан D, и продукты взрыва выталкиваются из цилиндра. Затем все повторяется [1]).

[1] Мы видим, что из четырех тактов, на которые распадается один период машины, только в течение третьего такта машина получает энергию (от взрывающегося газа). В течение остальных трех тактов движение совершается по инерции: вследствие этого маховик четырехтактного двигателя делается особенно большим и тяжелым.

Вместо газа можно вводить внутрь цилиндра жидкое топливо (бензин, спирт, керосин, нефть), обращенное в газ или в мелкораспыленное состояние, сжигая затем его внутри цилиндра. К этому типу принадлежит двигатель Дизеля, который в настоящее время имеет самый большой коефициент полезного действия (до 25%).

Не имея ни особой топки, ни котла, двигатели с внутренним горением являются более легкими. Это обстоятельство имело огромное значение для развития автомобильного дела и воздухоплавания.

Задача 1. Машина паровоза в 800 лошадиных сил имеет коефициент полезного действия 6%. Сколько угля израсходует она в час, если 1 kg угля при сгорании дает 7000 Cal?

Реш. Пусть x (в kg) будет искомое количество. Оно дает 7000x Cal, что равносильно 7000×427 x kgm. В механическую работу превратится 6% этого количества, т.-е. $6 \times 70 \times 427$ x kgm. Мощность машины будет $\frac{6 \times 70 \times 427\,x}{3600 \times 75}$ HP; приравнивая это данному числу 800 HP и решая полученное уравнение, найдем $x = 1200$.

Задача 2. Найти расход горючего в час для керосинового двигателя с мощностью 100 HP и коефициентом полезного действия 20%.

Реш. Из таблицы стр. 153 находим теплотворную способность керосина—10 300 $\frac{\text{Cal}}{\text{kg}}$. Отсюда искомый расход—31 kg в час.

§ 229. Холодильные машины. — Мы видим, что тепловой двигатель для своего функционирования нуждается в двух телах различной температуры: одном — более теплом („нагревателе“), другом — более холодном (холодильнике). Двигатель берет теплоту от теплого тела, часть этой теплоты отдает холодильнику, а другую часть превращает в механическую энергию.

Можно построить машину, которая все делала бы наоборот (с обратным знаком, как говорится в алгебре): *отдавала* бы теплому телу теплоту, частью взятую от более холодного тела, частью произведенную на счет *полученной извне* механической энергии (из чего видно, что такую машину должна вращать какая-то внешняя сила).

Практический смысл такой машины заключается в том, что она от холодного тела отнимает теплоту, т.-е. охлаждает холодное тело еще сильнее. Это будет **холодильная машина**.

Положим, что надо поддерживать низкую температуру, напр., в мясном складе. Воздух из этого помещения всасывают под поршень воздушного насоса, приводимого в движение паровой машиной. При обратном ходе поршня этот воздух сильно сжимается, при чем на счет затраченной работы он нагревается выше 200°. Тогда пропускают его через трубы, окружаемые текущей водой из водопровода; воздух теряет все приобретенное тепло, но остается сильно сжатым. В таком состоянии его впускают под

поршень другого цилиндра, где он быстро расширяется без притока тепла; при расширении он производит работу за счет своей собственной теплоты и потому сильно охлаждается. Не доводя расширения до атмосферной упругости, выпускают этот воздух назад в холодильный склад.

Здесь воздух холодильного склада и вода водопровода являются двумя телами разной температуры, между которыми действует машина. Воздух играет роль более холодного тела, вода—роль более теплого.

Подобно этому действуют машины, служащие для конденсации газов посредством их охлаждения.

Мы видим, что холодильная машина нарушает естественный порядок природы, согласно которому теплота стремится переходить от более нагретых тел к менее нагретым. Но такое нарушение осуществляется ценою пожертвования некоторым количеством механической работы, превращающимся в *менее ценную* форму энергии—тепловую энергию.

Ленингр. Совета Р.С.Ф.С.Р. Отд. Нарк. Образ. 97 ШКОЛА

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
От автора	3
Вступление	5
Отдел первый. Общие механические понятия.	
Глава I. Меры протяженности	13
„ II. Измерение сил и масс	22
„ III. Измерение плотностей	33
„ IV. Движение и его законы	38
„ V. Законы равновесия и движения. Параллелограм сил	58
„ VI. О движении и равновесии твердого тела. Закон моментов	68
„ VII. Сложение параллельных сил	80
„ VIII. О работе и энергии	84
„ IX. О кинетической энергии	98
„ X. О трении	102
Отдел второй. Механические свойства вещества в твердом, жидком газообразном состояниях.	
Глава XI. Твердые тела	107
„ XII. Жидкости в равновесии	114
„ XIII. Жидкости в движении	124
„ XIV. Газы	127
Отдел третий. Учение о теплоте.	
Глава XV. Расширение тел при нагревании	139
„ XVI. Распространение теплоты	145
„ XVII. Измерение количеств теплоты	148
„ XVIII. Плавление и отвердевание	154
„ XIX. Парообразование и конденсация	159
„ XX. Тепловые двигатели и холодильные машины	171

Алфавитный указатель приложен ко второй части.

1 р.—У.

Государственное Издательство
Москва ★ Ленинград

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ШКОЛ ПОВЫШЕННОГО ТИПА

Книги А. БАЧИНСКОГО

Рабочая книга по физике, часть 1 (печ.).

Собрание вопросов и задач по элементарной физике, стр. 200, ц. 1 р. 25 к.

Учебник физики на производственной основе.

Вторая половина. Колебания и волны. Оптика. Электричество, стр. 176, ц. 1 р. 10 к.

Физика в трех книгах, полный курс.

Книга 1. Механика. Теплота. Сведения из химии. Метеорология, стр. 276, ц. 1 р. 75 к.

Книга 2. Учение о звуке. Учение о свете, стр. 152, ц. 1 р.

Книга 3. Электрические и магнитные явления, стр. 238, ц. 1 р. 50 к.

РАБОЧАЯ БИБЛИОТЕЧКА ПО ФИЗИКЕ

Под общей редакцией А. БАЧИНСКОГО

Бачинский А., Физико-технические таблицы, стр. 127, ц. 1 р.

Горячкин Е. Н., Как рассчитать и сделать электрическую проводку, стр. 104, ц. 70 к.

Горячкин Е. Н., Радио в школе. Работы по радио лабораторного и демонстрационного типа в школе II ступени, часть 1, стр. 144, ц. 1 р. 10 к., часть 2 (печ.).

Ирисов А. С., Звук и музыка, стр. 140, ц. 80 к.

Каменщиков Т. Е., Паровые машины, паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания, стр. 88, ц. 70 к.

Конашинский Д. А. и Халевов Б. В., Что такое электрификация, стр. 74, ц. 65 к.

ОПТОВЫЕ ЗАКАЗЫ НАПРАВЛЯТЬ
В ТОРГОВЫЙ СЕКТОР ГОСИЗДАТА РСФСР

Москва, Ильинка, Богоявленский пер., 4, тел. 1-91-49, 3-71-37, 5-04-56,
Ленинград, „Дом Книги", Просп. 25 Октября, 28, тел. 534-18,

И ВО ВСЕ ОТДЕЛЕНИЯ И МАГАЗИНЫ ГОСИЗДАТА РСФСР

МОСКВА, 9, ГОСИЗДАТ „КНИГА ПОЧТОЙ" или ЛЕНИНГРАД, ГОСИЗДАТ „КНИГА ПОЧТОЙ", а в пределах УССР — ХАРЬКОВ, ГОСИЗДАТ РСФСР „КНИГА ПОЧТОЙ"

ВЫСЫЛАЮТ НЕМЕДЛЕННО ПО ПОЛУЧЕНИИ ЗАКАЗА

КНИГИ ВСЕХ ИЗДАТЕЛЬСТВ, ИМЕЮЩИЕСЯ НА КНИЖНОМ РЫНКЕ

Книги высылаются почтовыми посылками или бандеролью наложенным платежом. При высылке вперед всей стоимости заказа (до 1 руб. можно почтовыми марками) пересылка бесплатно.

ИСПОЛНЕНИЕ ЗАКАЗОВ БЫСТРОЕ И АККУРАТНОЕ.

Каталоги, проспекты и бюллетени высылаются по требованию бесплатно